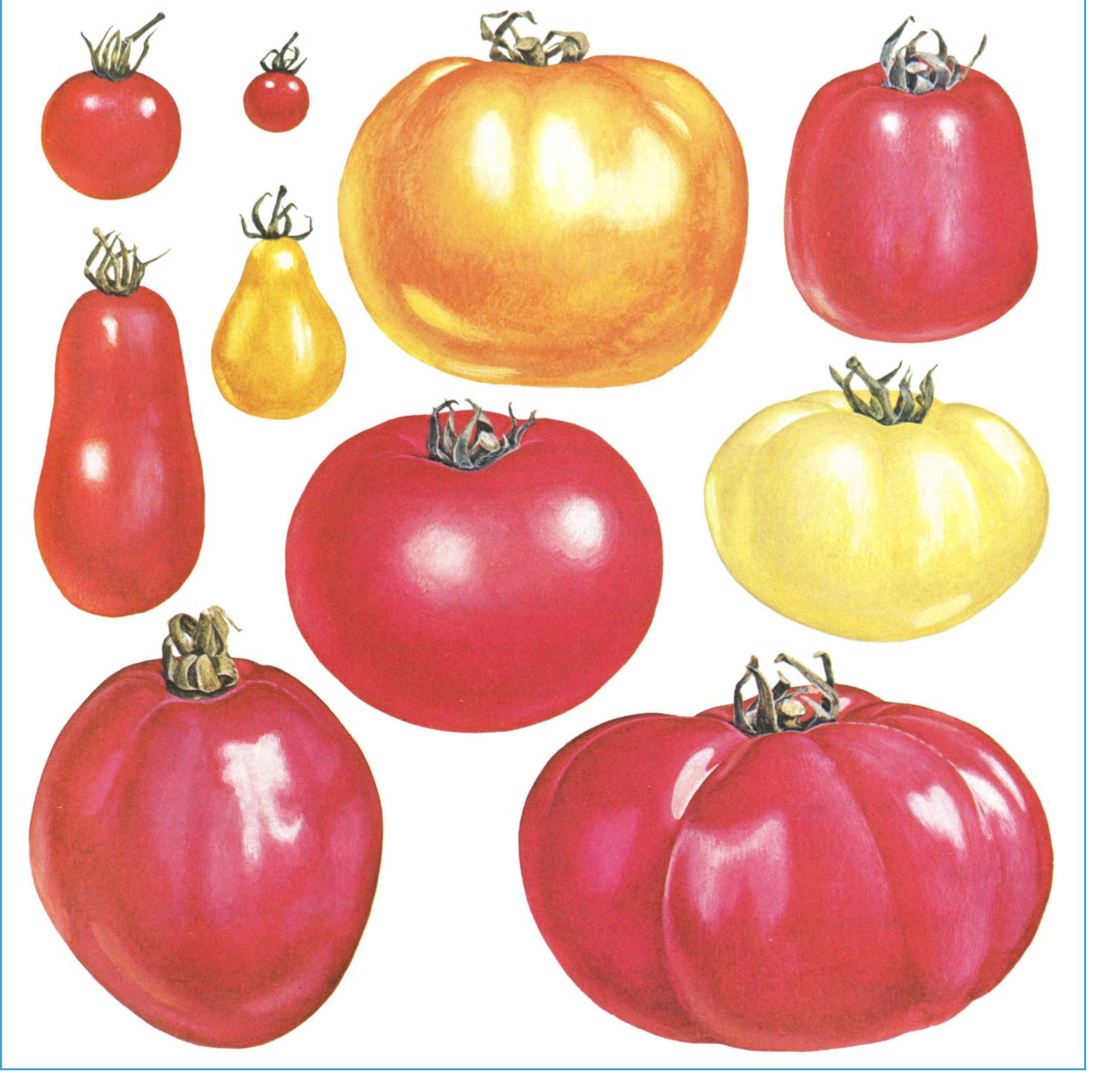
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



EL TOMATE

Octubre 1978

170 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 25
Octubre 1978

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

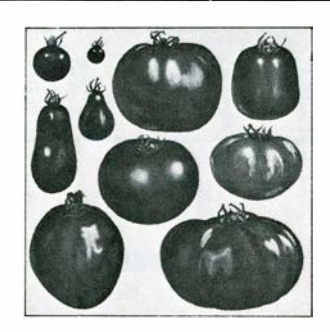
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Fidel Cunill: *La centrífuga de gas*; Manuel Puigcerver: *Vientos estelares*; Gerardo Espinosa: *Los homínidos de Turkana Oriental*; Juana Iriarte y Francisco Gil: *El tomate*; Luis Palacios: *El termostato de los vertebrados*; Miquel Gich: *El problema de las tectitas*; Joandomènec Ros: *Organismos que captan corrientes* ; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Rafael de Heredia, Adolfo Tobeña y Philip Morrison



LA PORTADA

Los frutos agrupados en la ilustración de la portada son bayas maduras de 10 variedades de la planta del tomate (*Lycopersicon esculentum*, a excepción del diminuto tomate-grosella que se halla en la fila superior, segundo por la izquierda, que pertenece a la especie *L. pimpinellifolium*). Las innovaciones registradas en los procesos de mejora han contribuido a hacer del tomate el principal cultivo comercial (véase "El tomate", por Charles M. Rick, en este número). Los cultivares de la fila superior *(de izquierda a derecha)* son: cereza, grosella, naranja del jubileo y poligonal, esta última desarrollada para la recolección mecánica. En la segunda fila observamos las variedades San Marzano, "pera amarilla", un híbrido F_1 de jardín y "bola de nieve", de color amarillo pálido. En la fila inferior se encuentran el "corazón de res" y la Ponderosa. Los colores que difieren del rojo normal están controlados por genes recesivos: *r* para carne amarilla, en pera amarilla y bola de nieve; *t*, para pulpa anaranjada, en jubileo, e *y*, para piel incolora, en bola de nieve, corazón de res y Ponderosa.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)

Precio de venta de este número:

España: 170 pesetas
Extranjero: 2 U.S.$

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 30 U.S.$

Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas

Difusión controlada por **OJD**

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada por Enid Kotschnig

Página	Fuente
7	U.S. Department of Energy
8-12	Allen Beechel
15	C. Roger Lynds, Leo Goldberg y Jack Harvey
16	Armin J. Deutsch
17-18	Dan Todd
19	Ray J. Weymann
20	Dan Todd
21	Ray J. Weymann
22	Dan Todd
27	Koobi Fora Research Project
28	National Aeronautics and Space Administration
29-30	Bunji Tagawa
31-51	Tom Prentiss
34-35	Bunji Tagawa
36-38	Tom Prentiss
44	Enid Kotschnig
46-47	Ilil Arbel
48	Charles M. Rick (*arriba*) Ilil Arbel (*abajo*)
49-50	Ilil Arbel
51	The John Henry Company (*arriba*) Ilil Arbel (*abajo*)
52-53	Ilil Arbel
59-60	Fotos CERN
61-65	R. Pascual, C. Pajares y A. Sellés
67	Patricia J. Wynne
68	Patricia J. Wynne (*arriba*) Patricia J. Wynne (*abajo*)
69-74	Albert Miller
77	John A. O'Keefe
78	Adolph E. Brotman
79	Instituto Soviético de Geología, Academia de Ciencias (*arriba*); Robert F. Fudali (*abajo*)
80	NERC ©, Institute of Geological Sciences, London (*arriba*); Smithsonian Institution (*centro*); Billy P. Glass (*abajo*)
81	Adolph E. Brotman
82	Dean R. Chapman
83-85	Adolph E. Brotman
89-90	Lorelle M. Raboni
91	Albert H. Markhart III (*arriba*), Lorelle M. Raboni (*abajo*)
92-94	Lorelle M. Raboni
95	Ben Rose
96	Lorelle M. Raboni
98	James Young
99-100	Ilil Arbel
101	Ilil Arbel (*arriba*), Ikuo Sakurai (*abajo*)
102	Ilil Arbel
103-107	Michael Goodman

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

En el artículo "El sistema de apareamiento de lek del gallo de las artemisas" (de R. H. Wiley, Jr., julio), el autor discute acerca de las posibles ventajas evolutivas que representa el complejo comportamiento asociado al apareamiento de un lek y, dentro del mismo, el acceso diferido a la cópula de los jóvenes gallos de las artemisas, y concluye que no puede aducirse ventaja evolutiva en una mayor duración de la vida de los machos que, finalmente, logran llegar al centro de cópula y aparearse repetidamente después de, quizá, dos años de abstinencia sexual.

El autor expone las dos teorías (de la "atracción sexual" y del "juicio de Dios") que explicarían las ventajas de los machos en un sistema de aparemiento de lek, y critica la segunda sobre la base de que no es cierto que "los machos con éxito tienen mayor eficacia porque han sobrevivido durante más tiempo", pues "la elevada fecundidad de los machos... no significa necesariamente que... posean una eficacia evolutiva superior, y tampoco... que esta última sea producto de una mayor duración de vida".

El autor parece olvidar que, entre la llegada de los machos a un lek en un año determinado y la llegada de los sobrevivientes de estos machos, más los jóvenes, al mismo lek y al año siguiente, un factor de evolución ha estado actuando sobre los gallos de las artemisas: la selección natural. Puesto que no cabe aducir la ventaja del "más fuerte" en unos combates territoriales que están muy ritualizados, y puesto que la única prelación de un macho con respecto a otro es su mayor proximidad al centro de cópula del lek (proximidad en la que desempeña un papel importante el azar), deberá admitirse que los animales más cercanos al centro de cópula son los que, por término medio, han logrado sobrevivir más tiempo, es decir, aquellos a los que la selección natural, actuando de formas muy distintas (depredación, enfermedades, competencia, etc.), ha respetado al tiempo que sacrificaba a los demás.

Se entiende entonces perfectamente que exista la segregación observada en cuanto a los apareamientos: sólo se aparean los machos del centro de cópula, que, casualmente, son los que llevan (siempre por término medio) más tiempo realizando el "avance centrípeto" de que habla el autor, lo que significa que han vivido más tiempo sometidos a los factores de selección, lo que implica, en definitiva, que han sobrevivido a las pruebas de una vida azarosa (la mortalidad se ha estimado en cerca del 50 por ciento) y, por tanto, son "merecedores" de transmitir sus genes a las generaciones posteriores.

El mecanismo resulta entonces similar al de la selección sexual que resulta de las luchas reales o ritualizadas entre machos de otras especies de animales, en las que sólo el "vencedor" (o el macho dominante en las especies con jerarquía social) se aparea. Aquí la lucha por conseguir llegar a la cópula es más con el ambiente que con otros machos.

Es decir, el complejo avance hacia un centro de cópula en un lek, y el acceso al apareamiento limitado a los machos que en él se encuentran, es el mecanismo de que se vale la especie para asegurar que los genes que pasarán a la generación siguiente han tenido el tiempo suficiente para demostrar su eficacia evolutiva, manteniendo con vida al macho que los porta. En este contexto, y quizá mejor que "bimaturismo sexual", cabría llamar al fenómeno descrito por Wiley "pubertad social" (pues el sistema social impide el apareamiento a machos que ya podrían, fisiológicamente, llevarlo a cabo).

Es mi criterio que en los estudios de comportamiento no deberían olvidarse las implicaciones ecológicas asociadas que, como en este caso, podrían indicar por ejemplo qué características permiten que un macho sobreviva de un año para otro, puesto que resulta claro que, en definitiva, es el macho sobreviviente el que terminará ocupando el territorio central del lek.

JOANDOMÈNEC ROS

Departamento de Ecología
Universidad de Barcelona

Señor Director:

El artículo de Richard A. Muller "La radiación cósmica de fondo y el nuevo movimiento del éter" (INVESTIGACION Y CIENCIA, julio) proporciona una información clara y entretenida sobre una de las mediciones más importantes en el campo de la cosmología observacional. Los astrónomos pueden ya delinear el movimiento peculiar de nuestro Sol dentro de la expansión de Hubble y construir de manera más precisa el diagrama de Hubble. Esto está dando ya resultados. Las observaciones realizadas por mis colegas y por mí mismo muestran que uno de los cúmulos de galaxias más cercanos, el cúmulo de Virgo, tiene una velocidad peculiar de unos 655 ± 99 kilómetros por segundo. En otras palabras, el cúmulo de Virgo se está apartando de nosotros a esta velocidad sumada a la velocidad de expansión de Hubble que sería de unos 847 km/seg.

La velocidad peculiar de la galaxia medida por Muller y sus colaboradores, George F. Smoot y Marc V. Gorenstein, la velocidad peculiar de las galaxias ejemplo de Rubin-Ford y la velocidad peculiar del cúmulo de Virgo son coherentes con los movimientos esperados de cúmulos de galaxias dentro de los límites de supercúmulos de galaxias. Este es un punto que hubiese merecido la pena mencionar en el artículo de Muller. Una sugerencia reciente, hecha por Michael Rowan-Robinson en *Nature* (3 de noviembre de 1977), considera la posibilidad de que esté teniendo lugar un movimiento a una escala incluso mayor: el movimiento rápido de supercúmulos totales relativos unos a otros. Observaciones claramente adicionales del "nuevo movimiento del éter" en el Hemisferio Sur (que Muller piensa llevar a cabo) y de velocidades peculiares adicionales del cúmulo servirán de gran ayuda para configurar la estructura fina del diagrama de Hubble.

DONALD H. GUDEHUS

Departamento de Física
Los Angeles City College

En cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 24 de la vigente Ley de Prensa e Imprenta, se hacen constar, a continuación, los datos en él requeridos.

Accionistas de Prensa Científica, S. A.:
Editorial Labor, S. A.
Scientific American, Inc.

Consejo de Administración:
Presidente:
D. Donald H. Miller, Jr.
Vicepresidente:
D. José M.ª Naharro Mora
Consejero-Delegado:
D. Francisco Gracia Guillén
Vocales:
D. Juan Miró Chavarría
D. Gerard Piel
D. Dennis Flanagan
Secretario:
D. Agustín Maria Rabarté

Situación financiera al 31 de diciembre de 1977, según se deduce del balance aprobado por la Junta General ordinaria de Accionistas celebrada el día 11 de mayo de 1978.

ACTIVO	
Tesorería	19.980.756.–
Existencias	9.380.621.–
Inmovilizado	281.078.–
Resultados	10.292.732.–
	39.935.187.–
PASIVO	
Capital	6.000.000.–
Cuentas acreedoras	33.935.187.–
	39.935.187.–

Los autores

DONALD R. OLANDER ("La centrífuga de gas") es profesor de ingeniería nuclear de la Universidad de California en Berkeley. Realizó sus estudios en la Universidad de Columbia, donde obtuvo el grado de licenciado en química e ingeniería química, este último en 1954. Permaneció un año en la Universidad de París estudiando química física, subvencionado con una beca Fulbright. A su regreso, preparó el doctorado en ingeniería química en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, realizando su tesis de investigación sobre el reprocesado de combustibles nucleares. En 1958 ingresó en el departamento de ingeniería química de Berkeley, promoviendo el recién creado departamento de ingeniería nuclear en 1961.

RAY J. WEYMANN ("Vientos estelares") es Profesor de astronomía de la Universidad de Arizona. Recibió su grado de Bachelor del Instituto de Tecnología de California en 1956 y el Doctorado en astronomía en la Universidad de Princeton en 1959. Habiendo hecho su trabajo de tesis doctoral sobre la teoría de la pérdida de masa en estrellas rojas gigantes, continuó en el tema desde el punto de vista de la observación durante los dos años siguientes como colaborador post-doctoral en los Observatorios Hale. Pasó después al Observatorio Steward de la Universidad de Arizona, donde desempeñó el cargo de director y jefe del departamento de astronomía de 1970 a 1975. Sus anteriores temas de investigación incluyeron materia intergaláctica y galaxias de Seyfert (sobre las cuales escribió un artículo en SCIENTIFIC AMERICAN), y en la actualidad está interesado en los orígenes y propiedades de las líneas de absorción en los espectros de los quasars.

ALAN WALKER y RICHARD E. F. LEAKEY ("Los homínidos de Turkana Oriental") han colaborado en los empeños por reconstruir e interpretar los cráneos fósiles de antiguos homínidos. Walker es profesor de biología y anatomía celular en la Facultad de Medicina de la Johns Hopkins. De origen inglés, estudió geología y zoología en la Universidad de Cambridge y obtuvo su doctorado por la Universidad de Londres. En 1975 fue al este de Africa a enseñar anatomía en la Facultad de Medicina Makerere de Uganda. De allí se trasladó a la Facultad de Medicina de la Universidad de Nairobi, en donde se inició su colaboración con Leakey. Desde 1973, Walker ha enseñado anatomía en los Estados Unidos, pero continúa realizando frecuentes visitas a Kenia para trabajar en los fósiles de Turkana Oriental. Leakey, hijo de Louis y Mary Leakey, es el director de los Museos Nacionales de Kenia y presidente de la Fundación para la Investigación de los Orígenes del Hombre. Su primera expedición a las zonas fosilíferas de Turkana Oriental tuvo lugar en 1968. Desde entonces, el Proyecto de Investigación de Koobi Fora se ha ampliado convirtiéndose en un equipo internacional de investigadores.

CHARLES M. RICK ("El tomate") es profesor en el departamento de cultivos vegetales del College of Agricultural and Environmental Sciences de la Universidad de California en Davis. Se graduó en la Universidad Estatal de Pensylvania y, tras trabajar un verano como asistente de mejora vegetal para la W. Atlee Burpee Company de California, se especializó en genética vegetal en la Universidad de Harvard. Presentada su tesis doctoral en 1940, trabajó en la facultad de Davis, lugar donde ha permanecido desde entonces, salvo para realizar viajes a los Andes para recolectar e investigar distintas variedades de tomates.

CARLOS PAJARES y RAMON PASCUAL ("Colisiones de hadrones a muy alta energía") pertenecen al Departamento de física teórica de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Pajares se doctoró en la Universidad de Madrid, completando su formación en las Universidades de Paris Sud y de Seattle (Washington), integrándose después en la UAB. Ha realizado también investigaciones en el Argonne National Laboratory, en el Rutherford Laboratory y en el CERN. Pascual fue becario de la Junta de Energía Nuclear, doctorándose después en la Universidad de Valencia. Ha sido profesor de las universidades de Madrid, Zaragoza y Autónoma de Madrid, antes de integrarse en la recién creada Universidad Autónoma de Barcelona. Ha trabajado en el International Centre for Theoretical Physics (Trieste), CERN y Universidad de Paris Sud, siempre sobre aspectos de la física de partículas elementales.

H. CRAIG HELLER, LARRY I. CRAWSHAW y HAROLD T. HAMMEL ("El termostato de los vertebrados") se conocieron cuando Heller y Crawshaw estudiaban aspectos de la regulación de la temperatura, subvencionados con sendas becas postdoctorales, en el laboratorio de Hammel en a Scripps Institution of Oceanography, de la Universidad de California en San Diego. Heller es profesor adjunto de biología en la Universidad de Stanford. Se graduó en el Ursinus College de Pensylvania y obtuvo el grado de doctor en la Universidad de Yale en 1970. Crawshaw es profesor adjunto de biología en la Universidad Estatal de Portland en Oregón. Estudió en la Universidad de California en Los Angeles y se doctoró por la Universidad de California en Santa Bárbara en 1970. Hammel enseña biología en la Scripps Institution y ocupa el cargo de director adjunto de su Laboratorio de Investigaciones Fisiológicas. Recibió el grado de "bachelor" en física por la Universidad de Purdue en 1943 y se incorporó luego al Laboratorio Científico de Los Alamos. Se graduó en la Universidad de Cornell, obteniendo el grado de "master" en física y el de doctor en zoología en 1953. Después de pertenecer durante ocho años a la Facultad de Medicina de la Universidad de Pensylvania y seis a la de Yale se incorporó a la Scripps Institution.

JOHN A. O'KEEFE ("El problema de las tectitas") es geofísico del Goddard Space Flight Center, de la National Aeronautics and Space Administration. Realizó su licenciatura en el Harvard College recibiéndose de doctor en astronomía por la Universidad de Chicago en 1941 con una tesis sobre las nubes negras de nuestra galaxia. Enseñó, por dos años, ciencias físicas en el Brenau College (Gainesville, Ga.); se incorporó luego en el Army Corps of Engineers como matemático especializado en geodesia (estudio del tamaño y forma de la tierra) y fue jefe de la Research and Analysis Branch del Army Map Service norteamericano. En 1958 ingresó en la NASA como jefe auxiliar de la Theoretical Division descubriendo, al cabo de poco, la componente de la forma de pera (el tercer armónico zonal) de la tierra.

STEVEN VOGEL ("Organismos que captan corrientes") es profesor asociado de zoología en la Universidad de Duke. Obtuvo su grado de bachiller en la Universidad de Tufts, y su doctorado en la Universidad de Harvard, en 1966, con una tesis sobre el vuelo de los insectos, posteriormente se incorporó a la facultad de Duke. Vogel escribe: "Mi interés por el vuelo se extendió a una preocupación general acerca de las adaptaciones de los organismos a los fluidos que se mueven en su derredor y a mi actual fascinación por el flujo inducido y los procesos de ventilación en las esponjas, las hojas, las madrigueras y los termiteros."

La centrífuga de gas

Esta máquina separa los isótopos del uranio mediante centrifugación de un compuesto gaseoso del mismo. Se espera que ocupe un lugar importante en la política estadounidense en torno a la limitación de nuevas armas nucleares

Donald R. Olander

Una pieza clave del esfuerzo del presidente Carter para detener la proliferación de armas nucleares es su programa de bloqueo del suministro de plutonio, que podría utilizarse para la fabricación de tales armas. A tal fin, el presidente está decidido a archivar el programa de desarrollo de un reactor regenerador (ya que el regenerador produce plutonio) y "suspender de una manera indefinida" el reprocesado comercial del combustible nuclear gastado (puesto que las barras gastadas de combustible de las centrales nucleares contienen plutonio que podría separarse y reciclarse). Corolario de esta política, dijo el presidente en la primavera del pasado año, "será el incremento de la capacidad de producción estadounidense de uranio enriquecido (el combustible para los reactores de agua común de la mayoría de las centrales nucleares) para proporcionar el adecuado y oportuno suministro de combustibles nucleares que cubra las necesidades nacionales y extranjeras".

El "enriquecimiento adicional" pretendido por el presidente supondría el tratamiento anual de más de 10.000 toneladas métricas de uranio, un aumento del 30 por ciento en la capacidad de enriquecimiento de uranio del país. Para lograr tal aumento, mediante el método de difusión gaseosa, que es el procedimiento utilizado en los Estados Unidos, desde los albores de la era nuclear, se requerirían dos grandes reactores nucleares dedicados solamente a satisfacer las necesidades de energía eléctrica de la planta de enriquecimiento correspondiente. Habida cuenta del elevado coste de la electricidad, la administración ha vuelto a considerar el método de enriquecimiento de la centrífuga de gases, sistema que ya se había ensayado en los comienzos de la era nuclear y desechado porque la tecnología de la centrifugación no estaba entonces suficientemente desarrollada. Pero hoy sí lo está. Además, el enriquecimiento mediante la centrífuga de gases consume solamente el 4 por ciento de la energía que requiere el procedimiento por difusión gaseosa; de este modo, un aumento del 30 por ciento en la capacidad de enriquecimiento podría fácilmente absorberse por la red eléctrica ya existente. A consecuencia de la nueva política, parece que la centrífuga de gases se convertirá en el núcleo de una industria de enriquecimiento de uranio que habrá de mover miles de millones de dólares.

La finalidad de cualquier sistema de enriquecimiento (se han probado varios, por lo menos a escala de laboratorio, además del método de la difusión gaseosa y del de la centrífuga de gases) es aumentar la concentración del isótopo de uranio 235, que se encuentra en un 0,71 por ciento en el uranio natural. El uranio 235 es el único isótopo fisionable que existe en la naturaleza; el otro 99,29 por ciento del uranio natural corresponde al isótopo 238, no fisionable. Los dos isótopos difieren ligeramente en su masa, ya que el núcleo del uranio 238 tiene tres neutrones más que el del uranio 235. Dicha diferencia proporciona una base para la separación de los isótopos y, por tanto, para aumentar la concentración de uranio 235 en un combustible nuclear.

En la difusión gaseosa la separación se efectúa gracias a que los compuestos gaseosos que acarrean uranio 235 fluyen, a través de una barrera porosa, algo más rápidamente que los mismos compuestos incorporando uranio 238. En una centrífuga la separación se logra haciendo girar el mismo compuesto gaseoso que posea los dos isótopos; el compuesto que contiene el isótopo más pesado es desplazado hacia la pared de la centrífuga, dejando la parte interna del gas enriquecida en el compuesto que contiene el isótopo más ligero.

Los isótopos de uranio se separaron por primera vez mediante centrifugación, en 1940, en las centrífugas experimentales de Jesse W. Beams, de la Universidad de Virginia. Sin embargo, la tecnología de la maquinaria, de elevada velocidad de rotación, necesaria para producir uranio 235 lo bastante enriquecido, correspondiente al programa de armamento, era inadecuada para tal labor; por esa razón se abandonó el método de la centrífuga en 1943, en favor del proceso de la difusión gaseosa. (La electricidad era entonces barata, y en cualquier caso el coste no hubiera sido el mayor problema.) Pero la teoría básica de la centrífuga de gases no se dejó de lado, sino que ha venido desarrollándose desde entonces.

W. E. Groth obtuvo mejoras en el tamaño, velocidad y eficacia de las centrífugas de gas en Alemania, durante varios años, subsiguientes a la segunda guerra mundial. En las postrimerías de la década de los cincuenta Gernot Zippe, que había estado experimentando con centrífugas de gas en su Alemania natal y posteriormente en la Unión Soviética, pasó a colaborar en un reducido programa experimental que acometía por aquellas fechas la Universidad de Virginia. Construyó una centrífuga ligera y resistente, a partir de la cual se han efectuado los diseños modernos.

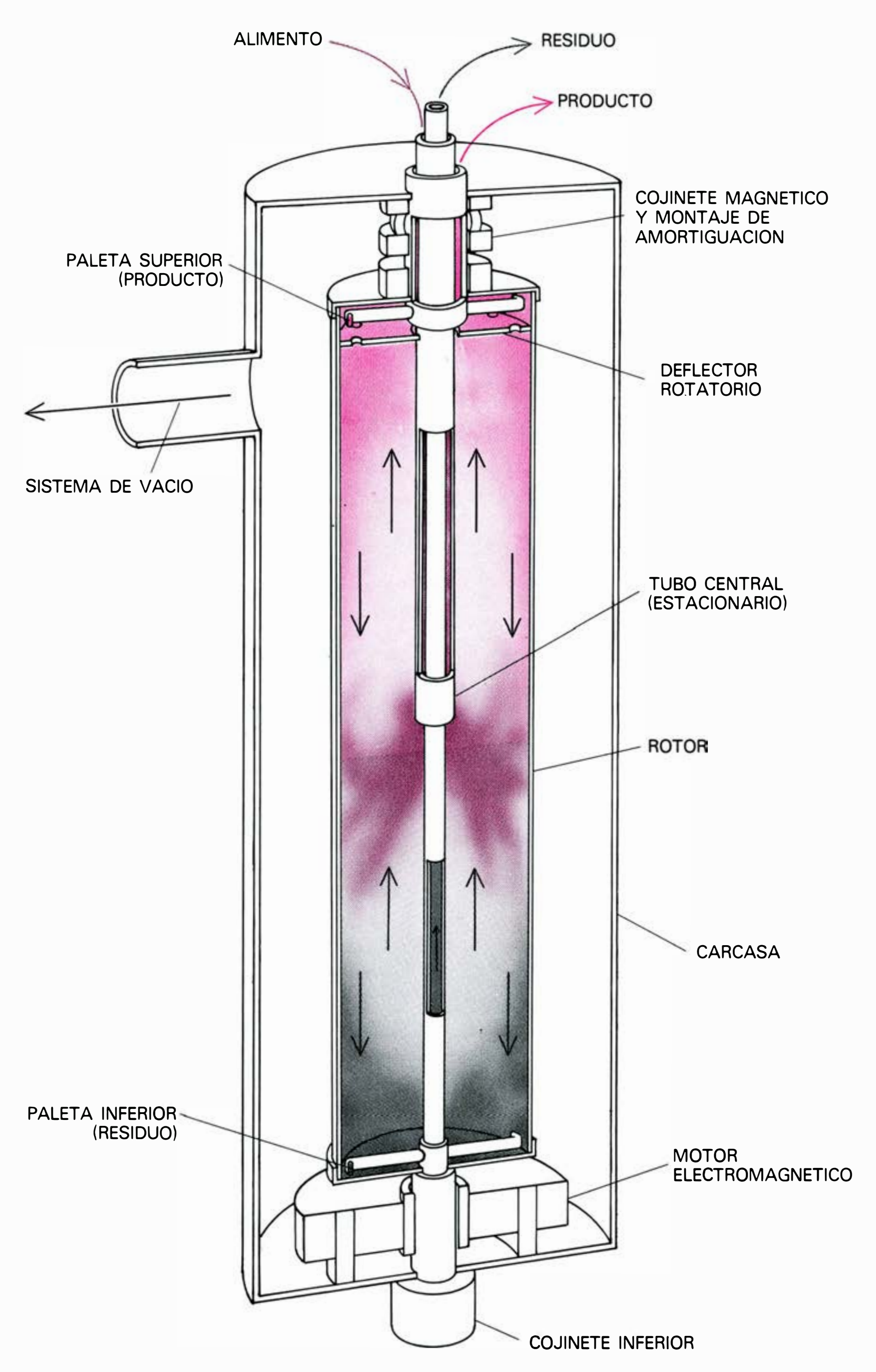
En 1960, como resultado del trabajo de Zippe, la Comisión para la Energía Atómica de los Estados Unidos autorizó un programa (con una subvención de 2 millones de dólares anuales) encaminado a lograr, a gran escala, el enriquecimiento del uranio, de una forma económicamente competitiva, basado en la tecnología de la centrífuga de gas. Por aquel entonces, la obligación de secreto, levantada del programa desarrollado después de la segunda guerra mundial, se impuso de nuevo, probablemente para evitar la divulgación de la información de cómo producir uranio para armas nucleares. Durante los 17 últimos años los Estados Unidos han venido avanzando en un programa de investigación y desarrollo, calificado de rigurosamente secreto, entre el Oak Ridge National Laboratory y la Universidad de Virginia. La asignación actual de este programa es de unos 80 millones de dólares anuales. También otros países industrializados pretenden poner a punto esta nueva técnica de separación. Británicos, holandeses y alemanes de la República Federal han constituido una compañía tripartita



CONJUNTO DE CENTRIFUGAS que forma parte de la planta experimental puesta en marcha para el Departamento de Energía por la Union Carbide Corporation, en el Oak Ridge National Laboratory. Cada una de las carcasas cilíndricas contiene un rotor alimentado con hexafluoruro de uranio. Dicho compuesto está formado por el isótopo fisionable uranio 235, que es el componente minoritario del uranio natural, y el isótopo no fisionable uranio 238, componente mayoritario. Se hace girar el gas a altas velocidades en el rotor, la fuerza centrífuga desplaza las moléculas más pesadas, las que contienen uranio 238, hacia la pared del rotor, produciendo una separación parcial de los isótopos. Mediante una diferencia de temperaturas y una paleta estacionaria situada en el fondo del rotor se produce una circulación vertical del gas, de modo que el gas enriquecido en uranio 235 pueda extraerse por la parte superior de la centrífuga y el gas empobrecido por el fondo. Al poder tratarse sólo pequeñas cantidades de gas en la centrífuga, se conectan varias centrífugas en "cascada".

(URENCO) para obtener el enriquecimiento mediante la centrífuga de gas, sobre una base que sea económicamente competitiva con el enriquecimiento por difusión gaseosa.

El único compuesto de uranio que es gaseoso a temperaturas ordinarias es el hexafluoruro de uranio (UF_6). Cientos de toneladas de esta sustancia han sido ya procesadas por las plantas de difusión de gases, de tal modo que sus características (puede ser altamente corrosivo) son bien conocidas. En el proceso de la centrífuga, la alimentación gaseosa es una mezcla de $^{238}UF_6$ y $^{235}UF_6$, y la ligera diferencia en sus pesos moleculares se utiliza para separarlos. Dicha separación se realiza haciendo girar el gas a velocidades muy altas, de modo que el $^{238}UF_6$, más pesado, se desplaza hacia e exterior y deja la zona más interna del gas enriquecida en $^{235}UF_6$, más ligero.

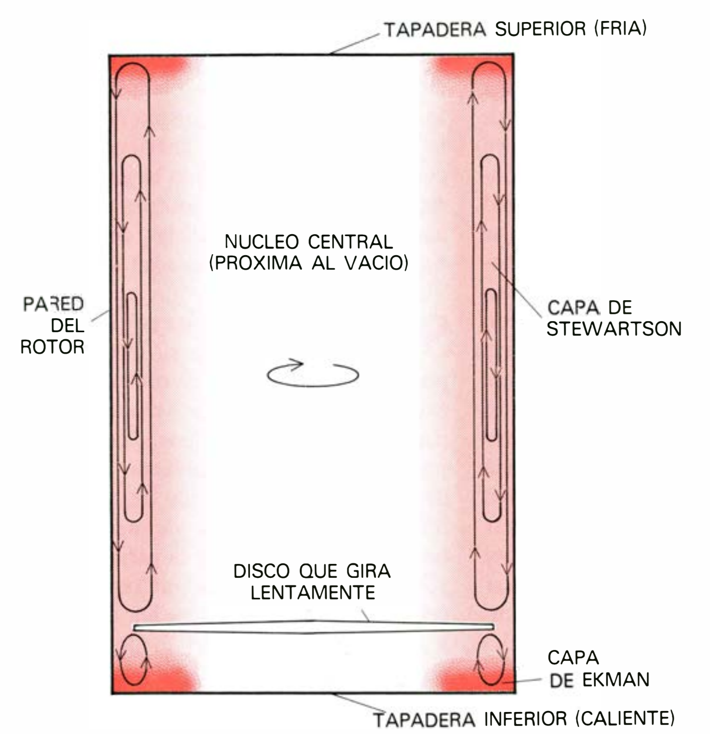


INTERIOR DE UNA CENTRIFUGA mostrado en este dibujo en corte. El rotor de la pared delgada se mueve mediante un pequeño motor electromagnético acoplado al fondo de la carcasa. El extremo superior del rotor se mantiene en una posición vertical gracias a un cojinete magnético y no está en contacto con los componentes estacionarios. El gas se introduce y se retira del rotor a través de un tubo central estacionario, que contiene a su vez tres tubos concéntricos para el alimento, producto y residuo. La paleta estacionaria del fondo sobresale en el gas que está girando, proporcionando un medio mecánico para impulsar un flujo vertical del mismo. La paleta de la parte superior, que sirve para retirar el producto enriquecido, se protege de la interacción con el gas que gira por un deflector, que tiene unos agujeros que permiten la purga del gas enriquecido hacia la zona próxima a la paleta. El deflector es necesario para evitar que la paleta superior imponga un flujo vertical que contrarreste el flujo crucial; éste se halla generado por la paleta inferior.

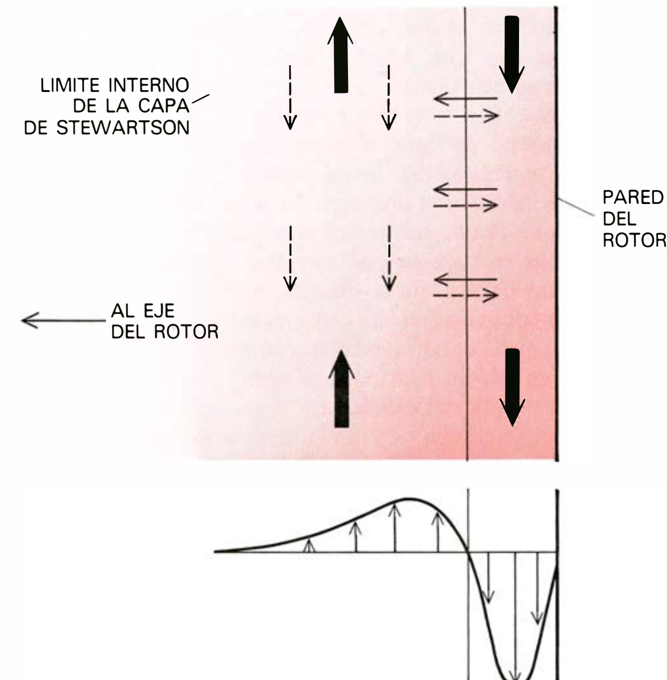
La teoría del proceso elemental de separación es relativamente sencilla: se rige por los mismos principios que dictan la variación de la densidad de la atmósfera con la altitud. La separación isotópica inducida por la fuerza centrífuga, establecida en el rotor giratorio vertical, es desde luego radial (horizontal). El éxito de la centrífuga como método económico de separación se debe al artificio de variar la dirección del enriquecimiento de radial a axial (y a la vez aumentar la cuantía del enriquecimiento) provocando una débil corriente axial (o flujo en contracorriente) en el movimiento rotacional del gas. Si no fuera por esta circulación vertical, sería difícil la extracción, de la centrífuga, de los isótopos por separado. Debido a esta circulación, el gas enriquecido puede retirarse por la parte superior de la centrífuga, del mismo modo que el gas residual sale por el fondo.

El tamaño y velocidad de las modernas centrífugas están todavía por clasificar, así como los materiales empleados para construirlas y los detalles de su diseño mecánico. Los componentes básicos, sin embargo, son de sobras conocidos. Un rotor cilíndrico de paredes delgadas gira dentro de una carcasa. URENCO señala que la velocidad periférica del rotor es de unos 400 metros por segundo. El alimento gaseoso se inyecta en el rotor, cerca del centro; el producto y el residuo se eliminan continuamente por la parte superior e inferior, respectivamente.

La cantidad total de gas presente en el rotor está limitada por la presión de condensación del hexafluoruro de uranio, es decir, por la presión a la que el gas se convierte en sólido; a temperatura ambiente, la presión de condensación es aproximadamente un sexto de atmósfera. El gas se estratifica fuertemente por el movimiento rotacional, de modo que la presión en el centro es mucho menor que en la pared. Además de la limitación en la cantidad de gas admisible en el rotor, el caudal de alimentación está limitado a valores que no alteren la delicada circulación axial, producida por una paleta situada en la parte inferior o bien por otro mecanismo, como puede ser un gradiente de temperaturas a lo largo del rotor o una tapadera enfriada en la parte superior. De acuerdo con la información hecha pública por URENCO, el caudal de alimentación de las máquinas europeas es de unos 100 miligramos de hexafluoruro de uranio por segundo.



MOVIMIENTO DEL GAS en una centrífuga. Se inicia con el efecto de la rotación (*a la izquierda*) que impulsa al gas contra la pared del rotor, en una región conocida como capa de Stewartson, en la que tiene lugar la separación efectiva de los isótopos. Como consecuencia de la diferencia de temperaturas entre la tapadera de la parte superior y la del fondo, y del efecto de la paleta, o cojinete, inferior (un efecto que matemáticamente se simula por un disco que gira un poco más lentamente que el rotor) se origina una débil circulación vertical (*flechas*). Además, se forman en los extremos de la capa de Stewartson unas zonas delgadas, en las que hay gas, conocidas como capas de Ekman, con una fracción de milímetro de espesor, en las que el flujo cambia de dirección.



La circulación en contracorriente y el transporte molecular en la capa de Stewartson (*a la derecha*) dan lugar al enriquecimiento del gas. Las flechas delgadas y continuas indican la dirección del movimiento del uranio 235 provocado por el efecto presión-difusión, que está causado por la fuerza centrífuga. Las flechas discontinuas muestran las direcciones del transporte del uranio 235 por difusión molecular. El movimiento convectivo global del gas se representa por las flechas gruesas. Las zonas sombreadas señalan que tienen concentraciones más altas de uranio 235. La curva inferior muestra un perfil típico de velocidades másicas (cuyas unidades son gramos por centímetro cuadrado y por segundo), propio de la circulación en contracorriente en la capa de Stewartson.

La carcasa exterior tiene dos funciones. Primera: proteger en caso de un fallo del rotor. (Los primeros diseños fallaron tantas veces que hubo quien, con sentido del humor, las llegó a denominar máquinas de desmontaje automático.) En las máquinas modernas, el tiempo de vida del rotor sigue siendo crucial: la ventaja económica de la centrífuga de gas sobre la difusión gaseosa se perdería si la duración media de la centrífuga fuera de unos pocos meses en lugar de muchos años. Gran parte del trabajo que se realiza en Oak Ridge está dedicado al ensayo de la durabilidad, a las velocidades de funcionamiento, de los rotores.

La segunda función de la carcasa es suministrar una cámara de vacío para el rotor. El vacío de la zona externa del rotor reduce el consumo de potencia que resulta del rozamiento cuando el rotor está girando. Para tal fin se conecta la carcasa a una bomba de vacío.

La separación isotópica alcanzada en una centrífuga de gases se rige por las ecuaciones de conservación de la mecánica de fluidos continuos, rama de la física que describe el movimiento de un fluido (gas o líquido) utilizando los principios de la conservación de masa y cantidad de movimiento. (Aunque la presión del hexafluoruro de uranio en la parte interna del rotor es tan baja que en dicha región sería más adecuada la aplicación de la dinámica de gases enrarecidos, la cantidad de gas en la misma es muy pequeña y puede despreciarse sin miedo.) El análisis teórico se divide en dos partes: hidrodinámica y separación. Al análisis hidrodinámico cumple determinar las velocidades del gas en las proximidades del rotor y en los extremos de la centrífuga. Una vez se han determinado las velocidades, el análisis de la separación revela cómo se ha separado el $^{235}UF_6$ del $^{238}UF_6$, a consecuencia de la acción combinada de la circulación impuesta al gas y de la fuerza centrífuga, que es la responsable del efecto de separación principal.

El desarrollo histórico de la teoría invirtió este orden lógico. La descripción matemática de la separación de isótopos, en un gradiente de presión, es muy similar a la correspondiente en un gradiente de temperaturas. En los años cuarenta, Karl Cohen, del Manhattan Engineer District (el "Proyecto Manhattan"), adaptó a la centrífuga de gases la teoría de la columna de difusión térmica desarrollada por Wendell H. Furry, R. C. Jones y Lars Onsager. Se podía disponer así de un análisis de separación, pero todavía no de la información hidrodinámica precisa para utilizarla. En 1960, la Comisión para la Energía Atómica creó un comité (presidido por Onsager) para arreglar el desajuste. El trabajo que actualmente se está efectuando en los Estados Unidos sobre la hidrodinámica de la centrífuga de gases (dirigido por el Departamento de Energía) corre a cargo de James A. Viecelli, del Lawrence Livermore Laboratory, y Richard A. Gentry, de Los Alamos Scientific Laboratory. La investigación europea y japonesa sobre la teoría de la centrífuga de gas (publicada en gran parte) ha procedido de forma paralela, pero con el desconocimiento del programa secreto de los Estados Unidos.

Si la temperatura de la pared del rotor fuera uniforme y si el rotor tuviera objetos sólidos no rotatorios, el gas simplemente giraría como un cuerpo sólido a la velocidad angular del rotor. Lo que sucede en realidad es que pequeñas discontinuidades temperatura en los cabezales extremos o a lo largo de la pared del rotor (junto con el efecto de la estacionariedad de la paleta del fondo sobre el gas que se arremolina a su alrededor) perturban el gas y establecen una circulación en contracorriente vertical que se superpone al flujo básico en forma de rueda. Esta suave contracorriente es la responsable de las características favorables de la centrífuga de gas

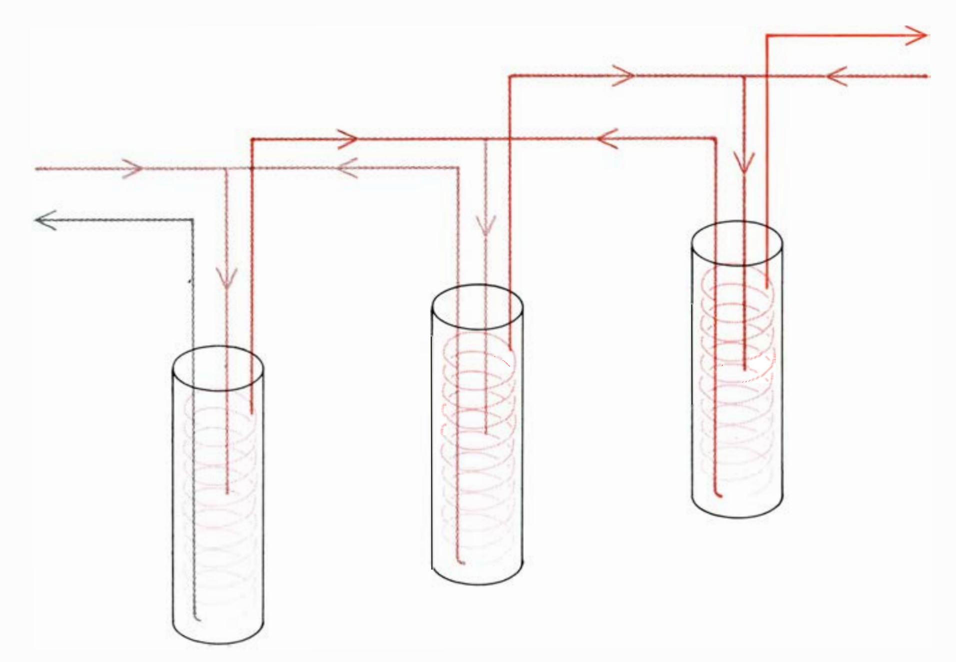
en la separación de isótopos. Para comprender y predecir el comportamiento de la centrífuga hay que describir teóricamente esa contracorriente.

No es cosa fácil someter a cuantificación el modelo de flujo de circulación dentro del rotor giratorio. Investigadores suecos y japoneses están probando un velocímetro láser, técnica que utiliza la reflexión de la luz en las pequeñas partículas del flujo para determinar la magnitud y dirección de la circulación. La razón para escoger un método tan esotérico como éste estriba en que los instrumentos ordinarios para medir velocidades de flujo (como puede ser el tubo de Pitot sujetado a la pared del rotor) son estructuralmente inestables en el fuerte campo de la fuerza centrífuga. Aun cuando fuera posible su empleo, un sistema telemedidor sin contactos presenta el problema de extraer del mismo la información que está recogiendo en cada instante.

El movimiento del gas se analiza resolviendo un conjunto de ecuaciones, más bien complejas, que relacionan la conservación de la materia, la energía y la cantidad de movimiento. Una situación como ésta es frecuente en mecánica de fluidos, pero en la mayoría de los casos (por ejemplo, el flujo de un líquido a través de un tubo circular o el flujo de aire en una aleta) las ecuaciones se simplifican drásticamente. Por desgracia, la dinámica de un gas en una centrífuga no permite simplificaciones del rigor matemático. Esta dificultad está a punto de superarse gracias al empleo de grandes ordenadores y de técnicas numéricas que substituyan a las analíticas.

El movimiento axial del gas, que constituye un punto crucial, se activa por las perturbaciones impuestas al flujo a través de la no uniformidad de la temperatura de la pared y de la presencia de una paleta en dicho fluido. La manera como las discontinuidades térmicas a lo largo de la pared influyen en el movimiento del fluido se entenderá mejor si nos fijamos en la analogía que guarda con la física de la atmósfera. Cuando el gas entra en contacto con un cabezal caliente, su densidad disminuye a medida que va absorbiendo calor; el gas tiende a ascender en esa "atmósfera", es decir, se mueve radialmente hacia dentro. Similarmente, una placa terminal enfriada hace que el gas se mueva hacia la pared del rotor. Este fenómeno, que tiene lugar en los cabezales extremos, y se conoce como succión de Ekman, puede impulsar a la contracorriente vertical en toda la longitud de la máquina. Se produce una circulación parecida por una variación continua de temperaturas a lo largo de la pared del rotor; si el fondo del rotor esta más caliente que la parte superior, los lazos de circulación son hacia arriba cerca del centro y hacia abajo cerca de la pared del rotor.

El efecto producido por la paleta resulta algo más complejo. Por tratarse de un objeto estacionario en una corriente de gas que se mueve a elevada velocidad, la paleta tiende a calentar el gas que roza con ella, en virtud del mismo efecto de fricción que produce el calentamiento de las alas y casco de una aeronave supersónica. El gas calentado asciende en la atmósfera. Además, la resistencia de la paleta reduce la velocidad tangencial y el gas se contrae radialmente con el fin de mantener la misma velocidad angular. De este modo la circulación generada por la paleta en el fondo del rotor tiene el mismo sentido que la producida por una distribución adecuada de temperaturas a lo largo de la pared del rotor y en los cabezales extremos, aunque las formas radiales de los dos tipos de circulación axial sean diferentes.



EL PRINCIPIO DE LA CASCADA se emplea para enriquecer el uranio en etapas sucesivas. En cada centrífuga, el hexafluoruro de uranio se separa parcialmente en un gas que contiene el isótopo más ligero, uranio 235, y en otro que contiene el isótopo 238, más pesado. La corriente enriquecida en uranio 235 (*color*) pasa a la etapa siguiente, en la que se convierte en un gas más enriquecido. La corriente empobrecida en el isótopo de uranio 235 (*gris*) pasa a la siguiente etapa, en la que se separa un gas de inferior riqueza.

Se observa, pues, que sea por el artificio térmico o sea por el mecánico se puede impulsar el flujo en contracorriente axial en la centrífuga. Las velocidades impartidas por los dos tipos de impulsos pueden controlarse cambiando el diseño de la centrífuga y el modo de operar. El impulso térmico puede variarse controlando el enfriamiento de la parte superior y el calentamiento de la inferior. El impulso mecánico se establece por el tamaño y forma de la paleta del fondo y por la posición radial de la misma en la atmósfera de gas próxima a la pared. El objeto del análisis hidrodinámico teórico consiste en calcular exactamente el flujo una vez se ha especificado la naturaleza física de los distintos impulsos y optimizar el modelo de circulación, y así lograr la mayor separación axial posible de los isótopos de uranio.

Calculada la distribución de velocidades del gas, el paso final será determinar la naturaleza y alcance de la separación de los isótopos de uranio en dicho gas. Tal labor se verifica resolviendo la ecuación de conservación que tenga en cuenta todos los fenómenos físicos que actúan sobre las dos especies isotópicas: la fuerza centrífuga (también llamada efecto presión-difusión), que tiende a concentrar el $^{238}UF_6$, más pesado, cerca de la pared del rotor; la convección, que actúa intensificando la separación producida por la presión-difusión, para permitir que la corriente interna ascendente se enriquezca continuamente cuando pasa desde el fondo a la parte superior, y la difusión molecular ordinaria, que es una fuerza opuesta a la separación.

El resultado neto de la interacción entre el proceso separativo y el convectivo es la acumulación del isótopo ligero ($^{235}UF_6$) en un extremo de la máquina y el gas empobrecido en dicho isótopo en el otro. La separación axial permite que se extraiga el producto y el residuo por la parte superior e inferior de la máquina respectivamente, aunque el fenómeno elemental de separación tenga dirección radial.

Una manera de medir la eficacia de una centrífuga, como separador de isótopos, es por el factor de separación, que se define como la razón de la cantidad de uranio 235 en el producto a la cantidad del mismo en el residuo. En las primeras centrífugas un factor de separación típico

era de 1,25, lo que significa que si la fracción de uranio 235 en el gas de alimentación es de un 0,71 por ciento, como en el uranio natural, el producto tendrá un 0,794 por ciento de uranio 235 y el residuo un 0,635 por ciento.

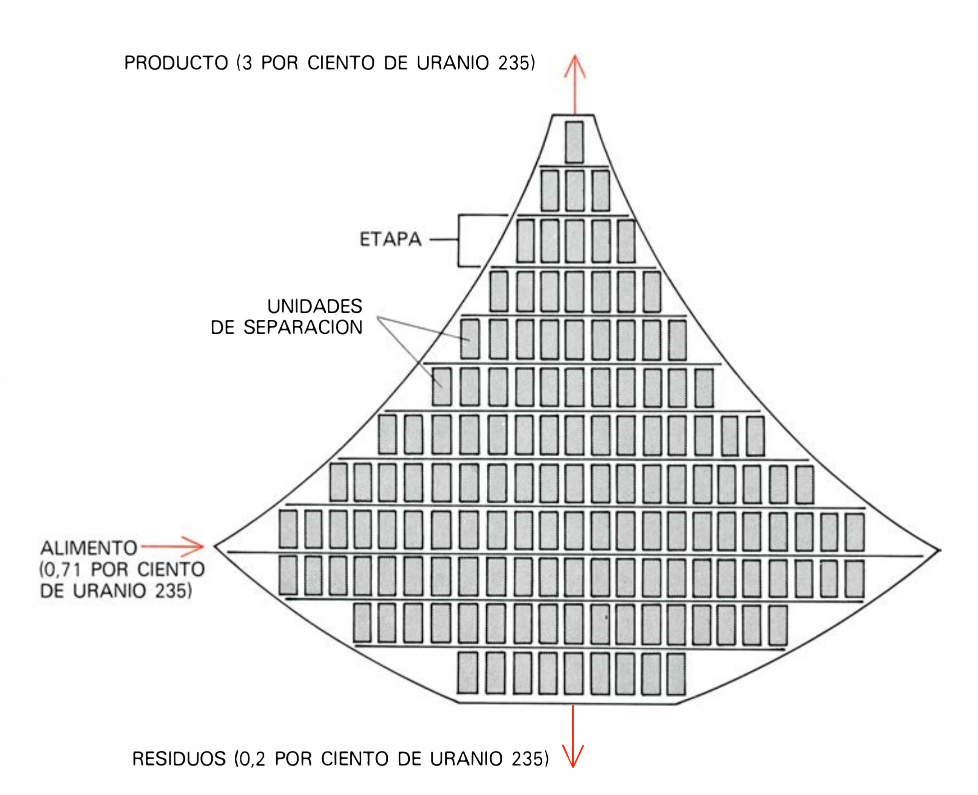
Podría parecer, en un principio, que el factor de separación es la medida natural de la capacidad de una centrífuga para separar isótopos, pero no lo es en realidad.

La centrífuga eficaz combina un factor de separación alto con el tratamiento de una elevada cantidad de materia prima. Por tanto, es preferible juzgar a una centrífuga (o a cualquier aparato de separación de isótopos) por una medida de la eficacia que tenga en cuenta ambos factores. Dicha medida se denomina potencia de separación, noción introducida en la época del Manhattan Project por P. A. M. Dirac y R. E. Peierls.

La noción tiene tres características esenciales. Primera: abarca todos los procesos físicos de separación. Segunda: es función del caudal de alimentación y de la "reducción" ("cut") de la máquina (razón del caudal de producto al de alimentación) y también de los factores internos, que gobiernan el fenómeno de la separación. (Para una centrífuga dichos factores incluyen la temperatura de la pared del rotor y la forma y posición de la paleta inferior.) Tercera: no es una función de la composición isotópica del gas en la unidad.

La potencia de separación se expresa generalmente en kilogramos de uranio (no de hexafluoruro de uranio) por año. Esta unidad, llamada unidad de separación (por año), constituye la medida universalmente aceptada de la potencia de separación de una sola centrífuga (o de una planta completa de enriquecimiento). El verdadero objetivo de una planta de separación de isótopos es la separación en sí, no el uranio enriquecido. Lo que esta idea revela es la capacidad de que una planta produzca o bien una pequeña cantidad de uranio altamente enriquecido o una gran cantidad de uranio ligeramente enriquecido.

La potencia de separación, como podría esperarse, guarda cierta relación con la potencia real necesaria para hacer funcionar un aparato de separación de isótopos. Y esta relación es, fundamentalmente, la que se halla en el núcleo de la declaración del presidente acerca de la elección de la centrífuga de gas, para la próxima generación de plantas de enriquecimiento norteamericanas. El consumo energético específico por parte de las unidades de difusión gaseosa es de unos 2500 kilovatios-hora por unidad de separación, cuya mayor parte se invierte en la recompresión del gas, que se ha difundido a través de la barrera porosa (hay que volver a comprimir el gas antes de enviarlo a la siguiente unidad de separación). La centrífuga necesita solamente 100 kilovatios-hora por unidad de separación. Esta energía se consume en compensar el rozamiento de las partes rotatorias, las pérdidas eléctricas debidas al calentamiento del motor, las pérdidas de presión cuando se saca el gas y la resistencia aerodinámica del gas contra la paleta y la pared interna del rotor (también la resistencia del gas residual en la carcasa contra la pared más externa).



UNA CASCADA IDEAL está formada de etapas, cada una de las cuales tiene un determinado número de centrífugas que operan en paralelo para suministrar el caudal necesario. Las etapas se conectan en serie para obtener el enriquecimiento deseado del producto y el agotamiento del residuo. Las etapas mayores están cerca de la entrada de la alimentación del gas; van disminuyendo su tamaño a medida que se aproximan a la salida del producto y del residuo. Las corrientes de gas de distinta composición isotópica no se mezclan.

Si se juzgaran los distintos procesos en liza solamente en razón del consumo mínimo de energía, la centrífuga de gas sería el vencedor claro sobre la difusión gaseosa. Pero debemos considerar también el coste de fabricación de los aparatos y la frecuencia de la sustitución de los mismos, puesto que la ventaja para dichas partidas está del lado del método de la difusión gaseosa. Cuando se calcula el coste total de separación ponderando las apropiadas contribuciones del consumo de energía y el capital invertido (y otras partidas más pequeñas), la centrífuga de gas se presenta como el método más económico.

En resumen, no es suficiente que un aparato de separación de isótopos suministre un gran factor de separación; debe poder manejar asimismo un caudal de alimentación de una magnitud suficiente que haga aceptable la potencia de separación. Aunque el sistema de separación de isótopos por excitación láser, muy favorecido por la propaganda, pueda suministrar grandes factores de separación, no se ha mostrado capaz de alcanzar la cantidad de alimentación suficiente para dar la potencia de separación por dólar invertido que represente una mejora sobre la centrífuga de gases o la difusión gaseosa.

La tecnología de la centrífuga de gases es, por encima de todo, una cuestión económica. Lo importante del asunto no es si el método funcionará, sino si producirá unidades de separación a más bajo coste que los procedimientos rivales. Pequeñas reducciones en la inversión por unidad de capacidad de separación instalada se traducen en grandes cantidades de dinero debido a la magnitud de la industria dedicada al enriquecimiento del uranio.

Supongamos que las previsiones sobre las necesidades estadounidenses en lo referente al enriquecimiento sean, hasta el año 2000, de 25 millones de unidades de separación, con las que satisfacer la demanda de la industria de energía nuclear nacional y la demanda extranjera implicada en la política del presidente. El capital necesario para construir las nuevas plantas de enriquecimiento será, aproximadamente, de unos 10.000 millones de dólares. Por tanto, una mejora de un 10 por ciento en la eficacia de cada máquina representaría aproximadamente mil millones de dólares. Esta cantidad justifica una importante investigación orientada a mejorar la productividad de las máquinas.

Las mejoras en el rendimiento han de registrarse en tres frentes de la tecnología

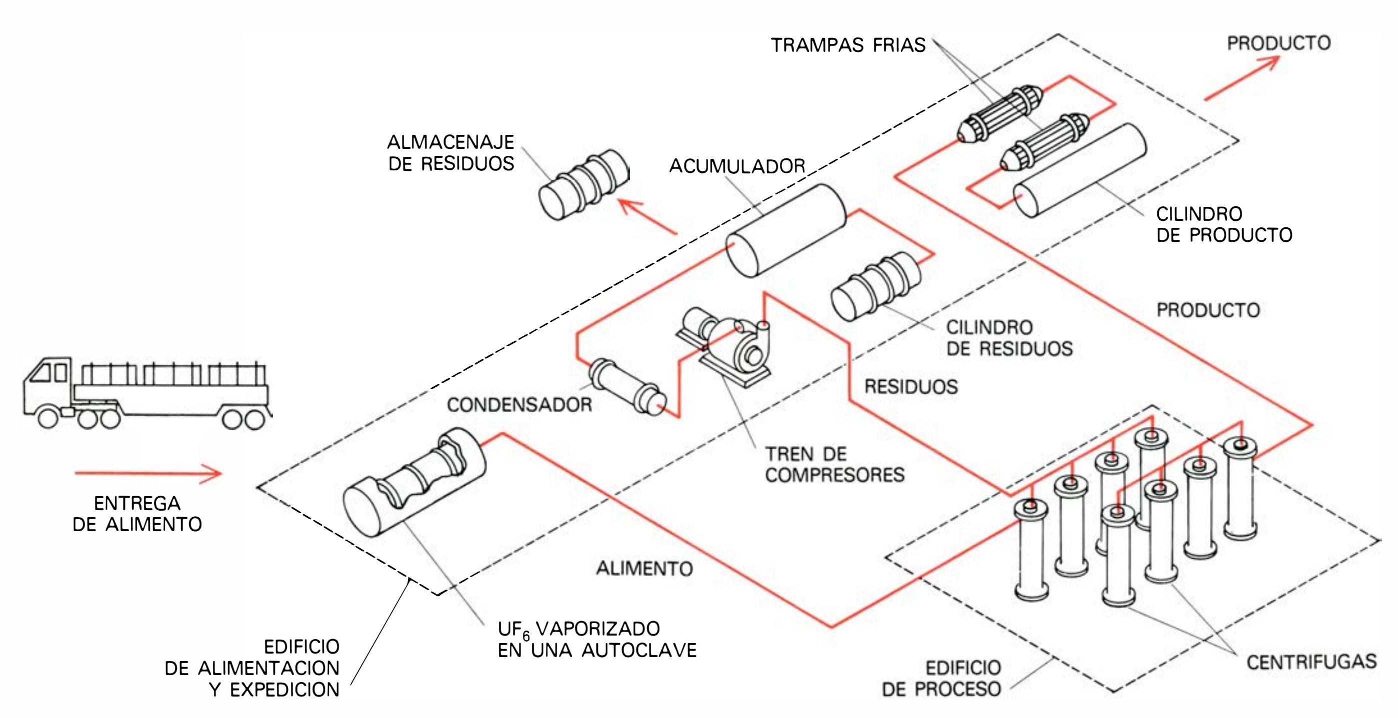


DIAGRAMA DE FLUJO que indica cómo podría operar una planta de centrífugas de gases. El hexafluoruro de uranio (UF_6) se recibe en la planta en cilindros de 14 toneladas. Se calientan para vaporizar el compuesto, que es entonces conducido a la cascada de centrífugas. Las corrientes de producto, que consisten en hexafluoruro de uranio enriquecido en uranio 235, se retiran de la cascada para el procesado final y se colocan en cilindros de 2 $^1/_2$ toneladas, para el transporte a la planta, que transforma el compuesto enriquecido en el combustible para los reactores nucleares. La corriente de hexafluoruro de uranio empobrecida se condensa y se recoge en cilindros de 14 toneladas, que se almacenan en un patio externo. La planta de enriquecimiento por centrífuga de gas que se está construyendo en Portsmouth (Ohio) tiene previstos ocho edificios de proceso (cada uno, del tamaño de 4 campos de fútbol) y otros edificios.

de la centrífuga de gases: en el diseño de la máquina, en el modo de operar de cada máquina y en la forma de conectarlas. Esencialmente, la potencia de separación en una centrífuga de gas está determinada por su velocidad de rotación y por la longitud de su rotor. La potencia de separación aumenta rápidamente con la velocidad del rotor y es proporcional a su longitud.

La velocidad periférica del rotor está limitada por la relación entre la tensión y la densidad del material con que está construido. Ciertas aleaciones de aluminio y acero inoxidable pueden soportar velocidades del rotor algo superiores a los 400 metros por segundo. Otros materiales compuestos pueden hacerlo mejor que los metales. Investigaciones procedentes de Europa y Japón sugieren utilizar un compuesto formado de fibra de vidrio y poliéster, del mismo tipo que el empleado en los volantes diseñados para almacenar energía; con materiales de este tipo la velocidad del rotor puede superar los 500 metros por segundo. Compuestos de carbón y fibra podrían alcanzar incluso velocidades más altas, pero por el momento resultan demasiado caros.

El límite de la longitud de la máquina está determinado, en parte, por la dificultad de controlar la rectitud del rotor y la uniformidad de la pared y por la duración del cojinete inferior, que tiene que soportar el peso del rotor. Otro asunto referente a las centrífugas que tienen una gran relación longitud/diámetro es la consecución de velocidades de operación, ya que tendrían que soportar velocidades críticas en las que pueden producirse vibraciones a gran escala.

A la hora de diseñar una centrífuga, el objetivo fundamental se centra en construir el rotor más rápido y más largo posible con el menor coste. Sigue la cuestión de seleccionar las condiciones de operación, una vez establecidos el tamaño y la velocidad. La tarea requiere una fina combinación de los distintos mecanismos impulsores del flujo, que afectan al rendimiento de la máquina. Este aspecto de la tecnología de las centrífugas no es, en absoluto, trivial: el poder separador depende por lo menos de seis factores manipulables que inciden en la circulación interna del gas en el rotor.

La etapa final en el montaje de una planta de enriquecimiento será decidir cómo habrán de conectarse las máquinas en la disposición conocida como cascada. Una cascada consiste simplemente en la interconexión de las unidades individuales en una red mayor con el fin de ampliar el efecto de separación de cada unidad. Sin embargo, el diseño de una red de este tipo dista mucho de ser sencillo.

Supóngase que cada centrífuga rinde un producto que es un 12 por ciento más rico en uranio 235 que el alimento que recibe. Se necesitaría repetir el proceso 13 veces para obtener la concentración de uranio 235 del 3 por ciento (empezando con el 0,71 por ciento del uranio natural), que es el adecuado como combustible para un reactor nuclear. Si la planta está también extrayendo uranio 235 del alimento hasta una concentración del 0,2 en el residuo, la operación necesitaría 11 etapas más.

En este ejemplo elemental se requieren 24 unidades conectadas en serie, en una planta que ha de procesar uranio natural hasta un producto enriquecido que contenga un 3 por ciento de uranio 235 y un residuo que contenga un 0,2 por ciento. No obstante, sería erróneo pensar que una planta de separación de isótopos consiste simplemente en 24 centrífugas conectadas en serie para suministrar el incremento necesario del efecto de separación. Esta serie de centrífugas individuales proporcionaría el enriquecimiento necesario, pero debido a los caudales pequeños de alimentación de cada máquina, la cantidad de material procesado sería lamentablemente pequeña. Una planta de enriquecimiento de gran capacidad exigiría cientos de miles de series de 24 unidades.

Por fortuna, este método simplista de conectar centrífugas no es la mejor forma de construir una cascada. Se descubrió pronto en el Manhattan Project que, para construir la planta más eficaz posible con una capacidad de separación especificada a partir de un gran número de unidades individuales de potencia de separación fija, las conexiones entre ellas debían disponerse en una configuración conocida

como cascada ideal. El término ideal significa que, cuando se mezclan dos corrientes en la planta, la composición isotópica tiene que ser la misma. Si no ocurriera así, la entropía, o desorden, del sistema aumentaría. Una cascada ideal, por tanto, se presenta como la cascada posible con el rendimiento más alto. Pueden idearse muchos tipos de cascada ideal para enriquecer el uranio con centrífugas de gas; es tarea del diseñador del proceso encontrar la cascada que explote más eficazmente las características de las centrífugas que la componen.

No importa qué método en particular se utilice para reciclar gas dentro de una cascada ideal; el número de centrífugas necesarias es el cociente entre la cantidad especificada de separación por año de la cascada y la potencia de separación de las centrífugas que la integran. Se dice que las centrífugas URENCO tienen una potencia de separación de 2 a 20 unidades de separación por año. Para construir una planta de enriquecimiento con una capacidad de nueve millones de unidades de separación por año, se necesitarían entre 500.000 y 5.000.000 centrífugas.

Dixy Lee Ray, ex-presidente de la Comisión para la Energía Atómica, ha dicho que los modelos de los Estados Unidos tienen un poder separador 10 veces mayor que el de las centrífugas URENCO. Se precisará todavía entre 50.000 y 500.000 centrífugas, para la próxima planta de enriquecimiento proyectada, que ha de construirse en los Estados Unidos, y que no será la última de esta envergadura que se construya. Evidentemente, la fabricación de centrífugas está a punto de convertirse en una industria importante y lo será por muchos años.

La organización de una simple planta integrada por un gran número de centrífugas supone gran cantidad de nuevos problemas de ingeniería. Cada centrífuga debe ser lo bastante económica como para evitar costes excesivamente grandes. En consecuencia, deben utilizarse las bombas de vacío y las válvulas más simples, las series de tuberías deben reducirse al mínimo y habrá que evitar materiales de construcción especiales. Los componentes deben diseñarse cuidadosamente para reducir las pérdidas de energía al nivel más bajo posible. Para un futuro previsible, no importa cuán avanzadas estén las centrífugas o cuál sea la última configuración de la cascada, una planta de centrífugas de gas para el enriquecimiento de uranio implicará un elevado número de unidades de separación conectadas por muchos kilómetros de tuberías, a través de las cuales circularán copiosas cantidades de hexafluoruro de uranio.

Vientos estelares

Se observa que estrellas de varias clases y tamaños lanzan materia al espacio formando una corriente lenta y constante. Cierto número de mecanismos pueden ser los responsables de este fenómeno común

Ray J. Weymann

Nadie que haya observado el lanzamiento de un cohete hacia el espacio puede haber dejado de sentirse impresionado por la enorme fuerza necesaria para libertar la nave de la férula del campo gravitatorio terrestre. La energía que se requeriría para extraer una cantidad comparable de materia de la superficie de una estrella sería cientos de miles de veces mayor. Puede, por tanto, constituir una sorpresa el enterarse de que casi cualquier clase de estrella, incluyendo el Sol, está expulsando hacia el espacio cantidades apreciables de materia, a veces en explosiones violentas y esporádicas y otras en la forma de una desconcertante corriente lenta y continua.

La comprensión de la manera como las estrellas esparcen su materia por el espacio interestelar y la velocidad a que lo hacen es importante por varias razones. Primero, la pérdida de materia en ciertas fases de la vida de una estrella puede tener un efecto notable sobre su futura evolución. Para algunas estrellas la pérdida de masa puede incluso ser crítica a la hora de determinar si finalizarán su vida de manera pacífica o violenta. Durante la mayor parte de su vida, las estrellas lucen a costa de la energía liberada por reacciones nucleares en su interior, en las cuales el hidrógeno se transforma en helio y subsiguientemente en elementos más pesados. Por grande que sea esta reserva de energía, es finita, y tarde o temprano cada estrella debe alcanzar un punto en su vida en el cual prácticamente agota su provisión de energía nuclear.

Aunque el conocimiento que los astrofísicos tienen de la evolución estelar dista de ser completo, parece bien establecido que básicamente hay dos posibilidades para la fase siguiente: la estrella puede convertirse bien en una supernova o bien en una enana blanca. En el primer proceso, la estrella sufre un colapso gravitatorio catastrófico acompañado por una violenta expulsión de sus capas exteriores. En el segundo proceso, la estrella se contrae tranquilamente hasta formar un objeto del tamaño de la Tierra e irradia lentamente su calor residual. También parece bastante bien establecido que la última alternativa no está permitida a estrellas cuya masa sea al menos dos o tres veces la del Sol. El reciente trabajo sobre las enanas blancas en grupos de estrellas realizado por J. Roger P. Angel y sus colaboradores en la Universidad de Arizona ha confirmado la sugerencia anterior de que muchas estrellas nacidas con una masa substancialmente mayor que la máxima posible para que una estrella se convierta en enana blanca han terminado realmente sus vidas como enanas blancas. Parece, pues, inevitable que esas estrellas hayan esparcido una porción substancial de su masa original, pero todavía no está claro en qué fase del curso de su evolución lo hacen ni mediante qué mecanismo.

En segundo lugar, la comprensión del proceso mediante el cual varias clases de estrellas expulsan materia es crucial para determinar si el gas en nuestra galaxia que no está condensado formando parte de estrellas se está enriqueciendo o agotando. Aún ahora, unos 15.000 millones de años después del nacimiento de nuestra galaxia y de la condensación en ella de las estrellas más antiguas, se están condensando continuamente nuevas estrellas a partir del gas interestelar. Una indudable prueba de esto la suministra, por ejemplo, el hecho de que en el seno de enormes nubes de gas haya muchas estrellas masivas, tremendamente luminosas, cuyo ritmo de consumo de energía es tan alto que sólo pueden vivir durante unos pocos millones de años. Si el intercambio de materia entre estrellas y gas fuera un proceso de sentido único (de gas a estrellas solamente) habría mucho menos materia en forma de gas no condensado que el 10 por ciento o así que es lo que realmente se encuentra hoy. Los astrofísicos interesados en el estudio de la evolución tanto del contenido estelar como del gaseoso en las galaxias (y el cambio gradual en la composición química de la materia) necesitan mejorar su comprensión de tales procesos de pérdida de masa para comprender la evolución galáctica.

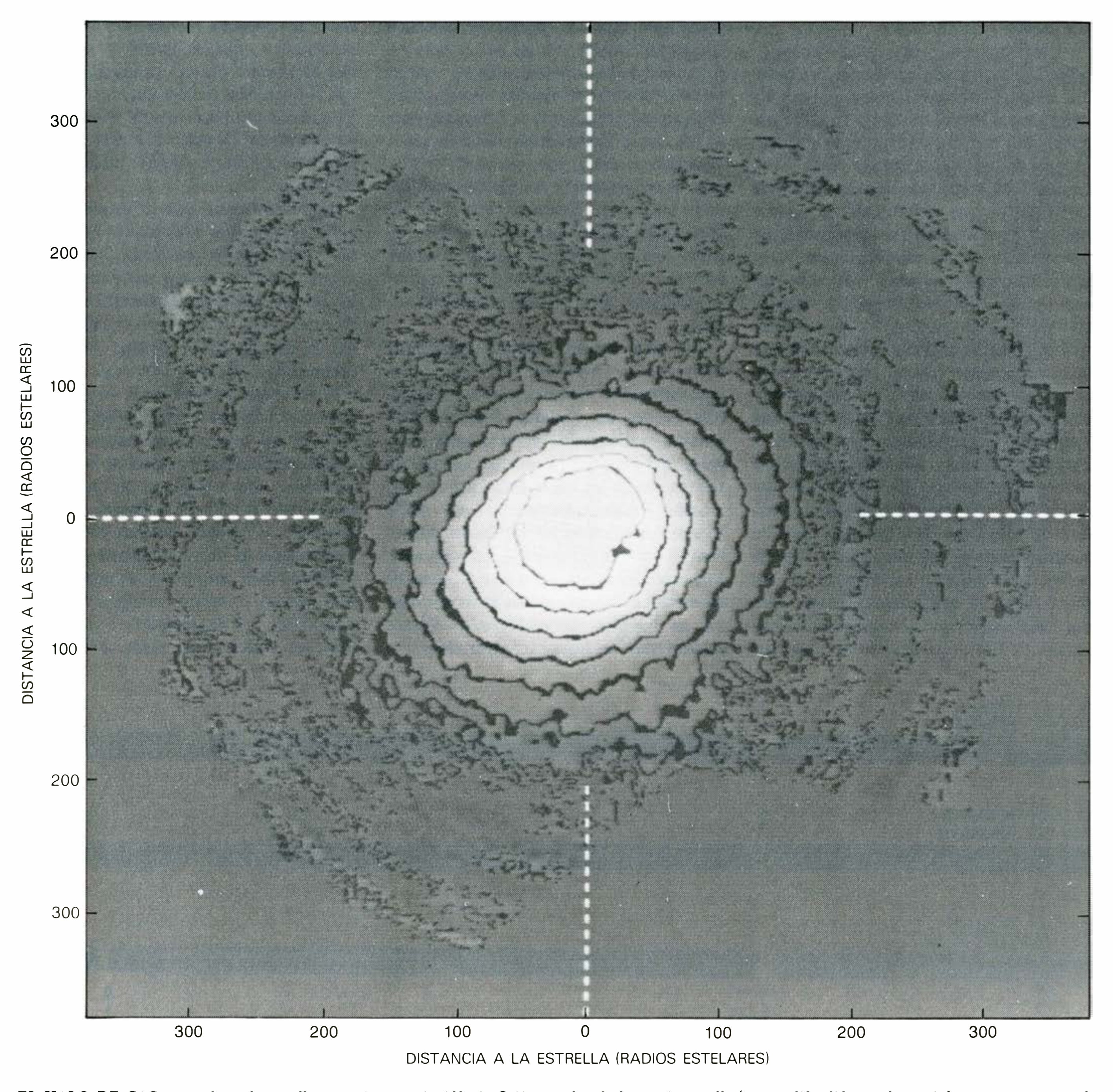
Tercero, el intento de comprensión del proceso de expulsión de masa está obligando a los astrónomos a examinar más cuidadosamente los procesos físicos que tienen lugar en las capas exteriores de las estrellas. Esos estudios llevan consigo preguntas acerca de las circunstancias bajo las cuales la envoltura de gases extremadamente calientes llamada corona puede existir alrededor de una estrella como el Sol, acerca de las circunstancias bajo las cuales se pueden condensar partículas sólidas en el gas comparativamente frío que rodea a una estrella y acerca de la correcta interpretación de lo que parecen ser movimientos, en gran escala y a gran velocidad, del gas en las capas exteriores de las estrellas muy luminosas.

La prueba de la pérdida de masa de las estrellas se basa en fotografías telescópicas directas o, más comúnmente, en espectrogramas estelares. En algunos casos, la materia es expelida en un episodio aislado o posiblemente varios. En las supernovas y las novas ordinarias, por ejemplo, la materia es generalmente expulsada en una única y violenta explosión. En las nébulas planetarias (llamadas así porque la inspección visual mediante pequeños telescopios dio a los antiguos astrónomos la impresión de discos planetarios) sólo se expulsó una capa única de gas, pero de manera mucho más suave. En otros casos, la materia parece estar desprendiéndose continuamente de la superficie estelar, a veces a velocidades muy grandes y a veces a velocidades pequeñas, lo que sugiere la existencia de una variedad de mecanismos de pérdida de masa muy diferentes entre sí.

El ejemplo más conocido de tal desprendimiento continuo es el Sol. Hace ya casi veinte años desde que se descubrió que un "viento solar" está soplando desde el Sol y barriendo la Tierra a su paso. En el resto de este artículo me concentraré en aquellos procesos de pérdida de masa que

tienen lugar en estrellas distintas del Sol y que también conllevan un flujo constante de materia, describiré las pruebas de su existencia y exploraré la cuestión de si el proceso que se cree produce el viento solar es también responsable de la producción de esos "vientos estelares".

El viento solar se ha descrito con cierto detalle en varios artículos previos en esta revista, pero es adecuado hacer aquí un breve resumen de sus orígenes y propiedades. La corona solar es un tenue halo, aproximadamente esférico, de gas extremadamente caliente que rodea el Sol. Los procesos que dan lugar a sus altas temperaturas (entre uno y dos millones de grados Kelvin) no son bien conocidos, pero se cree que llevan consigo la disipación de energía propagada hacia arriba desde la superficie solar por ondas de varios tipos, jugando los campos magnéticos un importante papel en la canalización de la energía. E. N. Parker, de la Universidad de Chicago, fue el primero en llamar la atención sobre el hecho de que la corona solar no puede ser estática. La temperatura del gas coronal es tan alta que, incluso a considerables distancias de la superficie del Sol, la gravedad solar es incapaz de reducir la presión que el gas ejerce a valores suficientemente bajos para que quede confinada por la presión del gas interestelar. Como resultado, la corona solar se ex-



EL HALO DE GAS que rodea a la estrella supergigante roja Alfa de Orión (comúnmente conocida por Betelgeuse) se puede ver en esta imagen generada por ordenador hecha recientemente por C. Roger Lynds, Leo Goldberg y Jack Harvey usando el espectrógrafo conectado al telescopio Mayall de cuatro metros en el Observatorio Nacional de Kitt Peak. La imagen se obtuvo apuntando la rendija del espectroscopio a varias posiciones en la proximidad de la estrella y registrando la intensidad de la radiación en, o cerca de, la longitud de onda característica emitida por los átomos neutros de potasio. Después de restar la luz de la propia estrella (que es difundida por la atmósfera terrestre y por el instrumento) y parte de la radiación difundida por partículas de polvo en la envoltura estelar, el resultado es un mapa de curvas de nivel indicando la intensidad de la luz difundida por los átomos de potasio en la envoltura estelar. El gas puede identificarse hasta distancias de varios cientos de veces el radio de la estrella antes de que la luz difundida se haga demasiado débil. A tales distancias, el campo gravitatorio estelar es tan débil que la velocidad radial del gas supera a la necesaria para el escape. Radio de la estrella: 800 veces el solar.

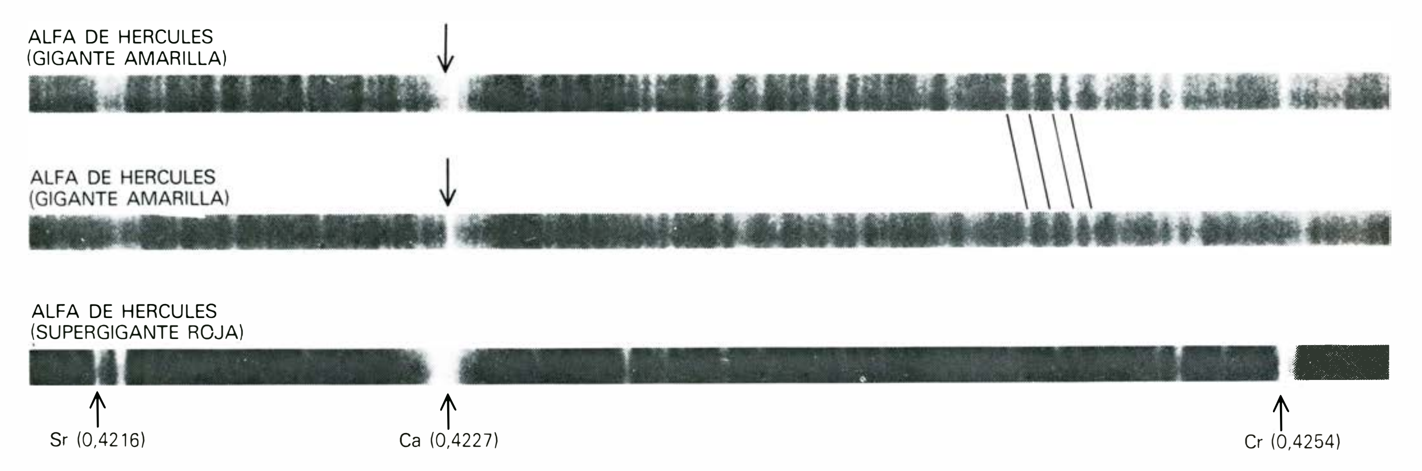
pande continuamente penetrando en el gas interestelar, y es reemplazada por nueva materia que fluye desde niveles más bajos en la atmósfera solar hasta que penetra en la zona de intenso calentamiento coronal. En esta descripción simplificada del viento solar, el impulso necesario para liberar cualquier partícula material del campo gravitatorio solar es proporcionado continuamente en la forma de un gradiente en la presión del gas coronal y es efectivo a causa de la extremadamente alta temperatura del gas. Tal viento se dice ser de origen térmico.

¿Hasta qué punto están tales vientos de origen térmico extendidos entre las estrellas de diferentes clases? Según todas las indicaciones, el Sol no tiene nada de excepcional y es razonable suponer que otras estrellas semejantes al Sol por razón de su temperatura y gravedad en la superficie (propiedades que determinan la mayor parte de las características observables de la atmósfera de una estrella) tengan coronas y los correspondientes vientos de origen térmico. Es casi imposible detectar tales vientos en relación con las otras estrellas similares al Sol; el viento solar solamente se puede detectar mediante medidas directas desde vehículos espaciales y observaciones indirectas de los efectos del viento sobre las colas de los cometas, y ninguna de esas dos técnicas es aplicable a las estrellas. Además, pese a lo activo del viento solar, la cantidad de materia contenida en él es pequeña y al ritmo presente el Sol tardará varios billones de años en perder una porción substancial de su masa. Esto es demasiado pausado para que tenga interés en los estudios de la evolución del Sol o del balance de masa del medio interestelar, pese al gran número de estrellas semejantes al Sol.

Uno de los acontecimientos mejor establecidos en la vida de una estrella es un aumento muy grande del tamaño de sus capas más externas hacia aproximadamente la misma época en que ha agotado el hidrógeno en su interior, principal combustible durante la mayor parte de su vida. Las estrellas con sus capas exteriores ampliamente distendidas se conocen como gigantes rojas o supergigantes rojas a causa de su tamaño y porque su superficie comparativamente fría les da un tinte rojizo. Uno de los resultados de su enorme tamaño (el radio de algunas supergigantes rojas es tan grande que la órbita terrestre entera cabría fácilmente en ellas) es que la velocidad necesaria para que la materia escape de sus superficies es mucho más baja de lo que era en épocas anteriores de sus vidas. Este hecho hace de la fase de gigante roja un candidato natural a examinar para la fase en que se podría esperar se produzca una pérdida substancial de masa.

En 1956, Armin J. Deutsch, espectroscopista en los Observatorios Hale, hizo un descubrimiento indicando que las gigantes rojas están en realidad desprendiendo grandes cantidades de materia hacia el espacio. Su hallazgo inició una intensa investigación de las capas exteriores de esas estrellas. Para apreciar lo que halló Deutsch, son útiles los siguientes puntos básicos de espectroscopía astronómica. Los espectrogramas de la mayor parte de las estrellas revelan muchas estrechas bandas de longitud de onda prácticamente desprovistas de luz en comparación con las regiones adyacentes del espectro. Estas líneas de absorción se producen como consecuencia de la extracción selectiva de longitudes de onda específicas en el haz emitido por parte de átomos de las capas exteriores y más frías de una estrella, fenómeno descubierto en el espectro del Sol por Joseph von Fraunhofer en 1814. Se sabía desde la década de 1930 que en los espectros de muchas gigantes rojas existía un conjunto extra de líneas de absorción, cuyas longitudes de onda estaban corridas hacia el azul en pequeña cuantía con respecto al conjunto normal de líneas, pero reducidas a aquellas líneas de absorción que solamente pueden producirse en un gas a muy baja temperatura y densidad. El corrimiento hacia el azul es producido por el efecto Doppler e indica un flujo neto de gas hacia el exterior de la superficie estelar.

Los espectroscopistas anteriores se habían resistido a admitir que el flujo hacia fuera representaba una pérdida neta y permanente de materia por parte de la estrella, ya que, aún desde la superficie de esas gigantes rojas, la energía requerida para que la materia pueda escapar es todavía típicamente 100 veces la energía asociada a la velocidad medida en el movimiento hacia fuera del gas. Lo que Deutsch descubrió fue que mucha de la materia no está situada precisamente encima de la superficie estelar, sino a distancia de varios cientos de veces el radio de la estrella, y a tales distancias la energía cinética del gas en movimiento es verdaderamente más que suficiente para permitir su escape. El descubrimiento se realizó analizando espectrogramas de la supergigante roja Alfa de Hércules. Cuando este objeto se observa a



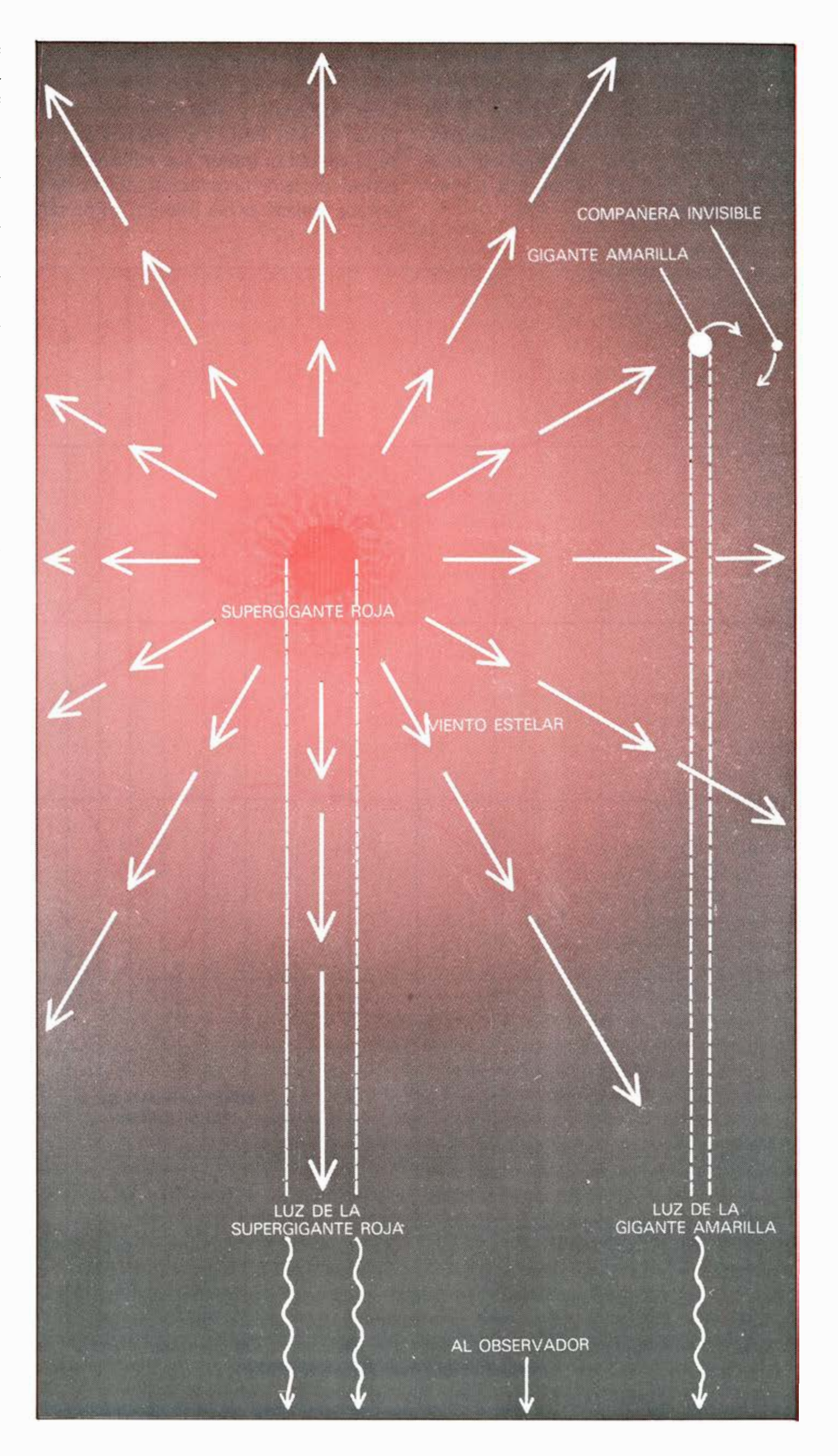
ESPECTROGRAMAS DE DOS ESTRELLAS en el sistema de estrellas múltiples Alfa de Hércules. Los espectrogramas, impresos aquí en copia negativa, condujeron al descubrimiento de que masivos flujos de viento soplan procedentes de la superficie de las supergigantes rojas. El espectrograma de abajo es el del miembro supergigante roja del sistema Alfa de Hércules. Las flechas hacia arriba indican huecos en el espectro de emisión de la estrella donde la luz ha sido absorbida por átomos de estroncio *(Sr)*, calcio *(Ca)* y cromo *(Cr)* en el gas procedente de la superficie estelar. (Los números que se acompañan dan la longitud de onda de las líneas de absorción en micrometros.) Los dos espectrogramas de arriba son del miembro amarilla gigante del sistema; se hicieron con varios días de intervalo. Como la propia gigante amarilla está encerrada en un movimiento orbital alrededor de un compañero demasiado débil para verse, la longitud de onda de la luz absorbida en la atmósfera de la gigante amarilla se traslada periódicamente debido al efecto Doppler; las líneas inclinadas indican corrimientos Doppler típicos. El gas de las supergigantes rojas se extiende a distancias tan enormes, que parte de él se puede detectar en el espectrograma de la gigante amarilla. Las flechas hacia abajo marcan las líneas de absorción producidas en los espectrogramas de la gigante amarilla por el vapor de calcio en el gas eyectado de la supergigante roja. El que esas líneas no hayan sufrido corrimiento Doppler muestra que no están asociadas a la gigante amarilla.

través de un telescopio, aparece realmente como una estrella doble, siendo la estrella compañera de la supergigante una gigante amarilla bastante corriente, separada en el cielo de la supergigante por un ángulo suficientemente grande para posibilitar la obtención de un espectrograma de la compañera no contaminado por la luz de la supergigante.

El espectrograma de la compañera amarilla reveló un conjunto de líneas de absorción trasladadas semejante al de la supergigante pero algo más débiles. El hecho de que líneas como esas no se observaran en otros casos asociadas a estrellas amarillas solitarias del mismo tipo constituía una prueba contundente de que las líneas de absorción proceden de una nube gigante en expansión que rodea tanto a la supergigante como a la compañera amarilla, de la cual se sabe que describe una órbita en torno a la supergigante a una distancia superior a 100 veces el radio de ésta.

La prueba decisiva en favor de esta interpretación provino del descubrimiento de que la propia compañera amarilla es una estrella doble. La estrella más débil de esta pareja está demasiado cerca de la gigante amarilla para poder separarlas mediante fotografías directas, y contribuye con una cantidad insignificante de luz al espectro; sin embargo, su presencia se puede detectar gracias a su campo gravitatorio, que causa un corrimiento Doppler continuo y periódico de la luz procedente de la gigante amarilla cuando la estrella amarilla y su invisible compañera giran una alrededor de la otra. El gas que produce las líneas cambiadas de sitio no participa en el corrimiento periódico, sin embargo; evidentemente, procede de una nube mucho mayor que la vecindad inmediata de la gigante amarilla.

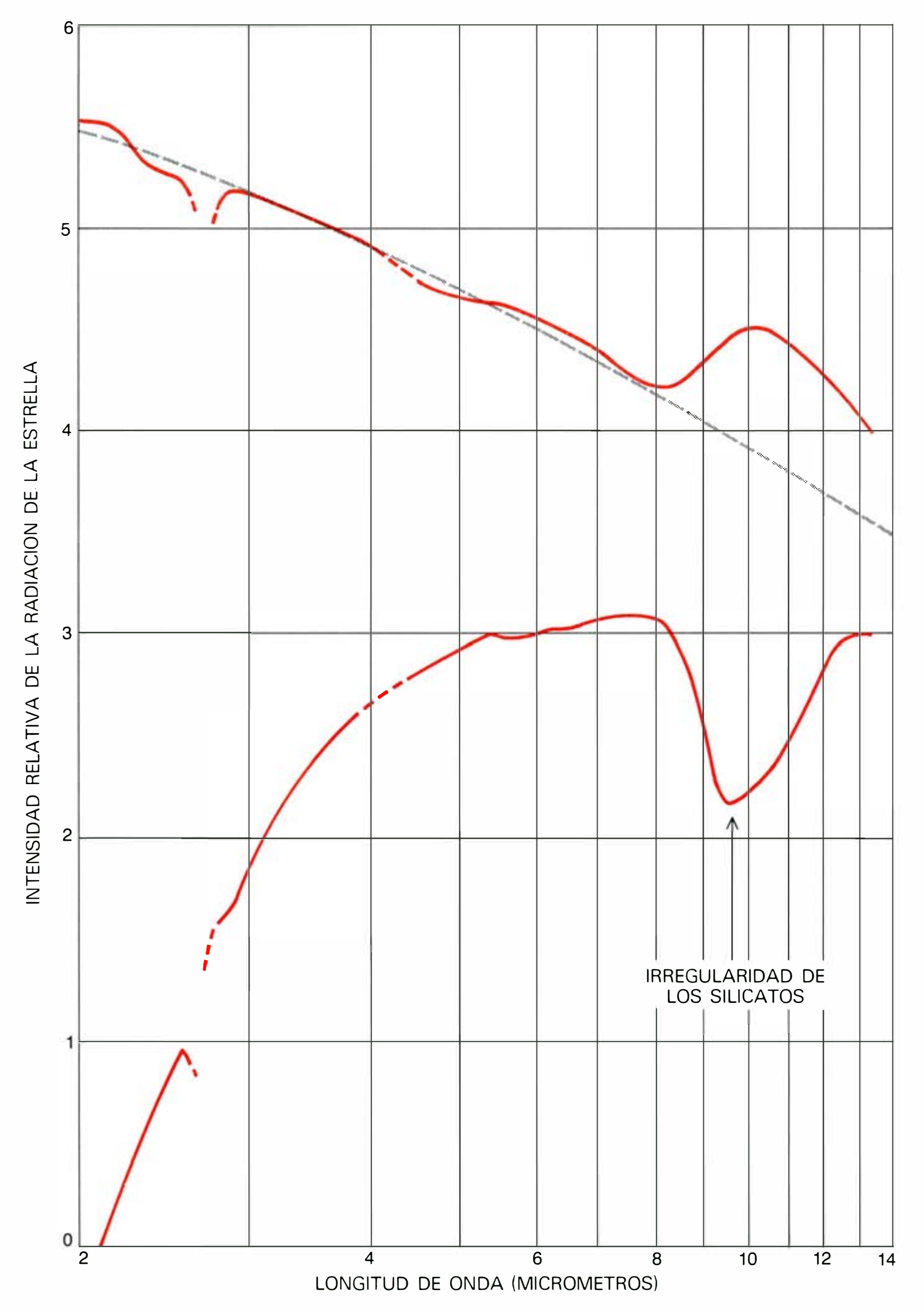
Al haberse dado cuenta de que las líneas de absorción corridas en los espectros de las gigantes rojas reflejan realmente una pérdida substancial de materia por parte de esas estrellas, Deutsch y varios otros investigadores exploraron muchas gigantes rojas y establecieron que la pérdida substancial de materia es una propiedad común a todas ellas. Recientemente se han obtenido, de diversas maneras, pruebas independientes de la existencia de esos vientos estelares en suave expansión. Los radioastrónomos han hallado que en las más frías de las gigantes rojas, las capas envolventes y en expansión son suficientemente frías y distendidas para poder emitir microondas detectables procedentes de las moléculas o grupos moleculares hidroxilo (OH), agua (H_2O) y óxido de silicio (SiO). En muchos casos, en esas nubes actúa un máser natural que hace la emisión molecular muy



GEOMETRIA del sistema de estrellas múltiples Alfa de Hércules, mostrada esquemáticamente. La supergigante roja está rodeada de una envoltura de gas relativamente caliente y turbulento, que es acelerado mediante algún mecanismo constituyendo el viento estelar. Este flujo de gas que se mueve hacia fuera se puede detectar en la luz de la estrella supergigante con la ayuda de un espectrógrafo. El viento estelar se extiende hasta una distancia tan grande de la supergigante roja que llega a envolver a la compañera gigante amarilla, algo menor, y puede detectarse espectroscópicamente en la luz de esta estrella. La gigante amarilla y una invisible compañera todavía menor giran cada una alrededor de la otra, pero el gas del viento estelar de la supergigante roja no participa en el movimiento, lo que indica que la mayor parte de este gas está alejado de la gigante amarilla. El dibujo no está hecho a escala; la separación entre la gigante amarilla y la supergigante roja es en realidad superior a 100 veces el radio de la supergigante roja.

intensa. Los cambios Doppler asociados a las líneas de emisión espectral en el dominio de las microondas se interpretan de la manera más sencilla en términos de un recubrimiento en expansión, y la descripción deducida de ellas concuerda en general bastante bien con la obtenida por espectroscopía óptica.

Una segunda pieza independiente, de sorprendente valor demostrativo, procede de dos grupos que trabajan en el Observatorio McDonald y en el Observatorio Nacional de Kitt Peak. Los mismos átomos de la envoltura estelar que selectivamente extraen parte de la radiación saliente de la estrella situada en su interior, dispersándola y con ello produciendo las líneas de absorción en el espectro, producen simultáneamente un tenue halo luminoso en torno a la estrella. La niebla produce un halo tenue alrededor de un farol distante mediante un mecanismo muy parecido, excepto que en el caso de la estrella solamente es difundida la luz correspondiente a estrechos intervalos de longitud de onda. Ambos grupos de observadores han logrado detectar esta luminiscencia, confirmando con ello la enorme extensión del recubrimiento que rodea a tales estrellas.

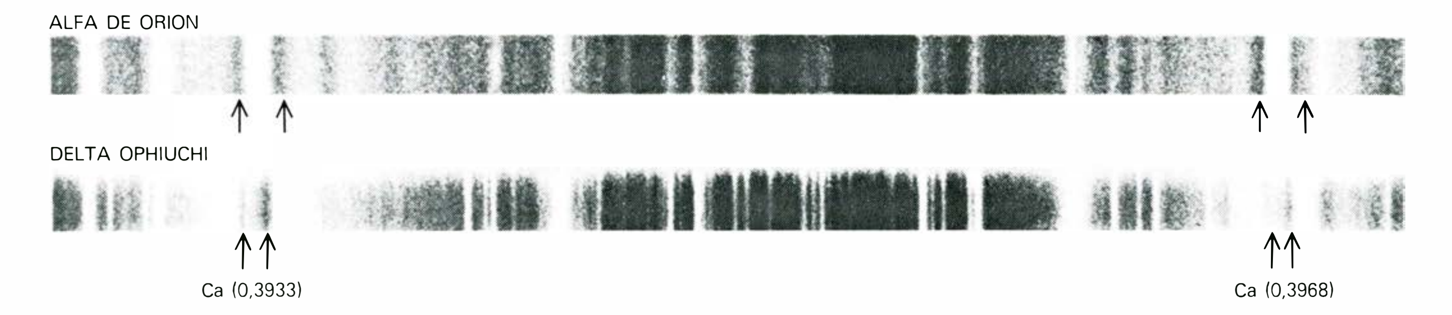


EFECTO DEL POLVO ESTELAR sobre la distribución espectral de energía de dos estrellas comparativamente frías; el gráfico se basa en un estudio recientemente realizado por K. Michael Merrill, de la Universidad de Minnesota. En el caso de la estrella llamada Mu de Cefeidas (*curva superior en color*), la cantidad de polvo en la envoltura gaseosa que rodea la estrella es más bien pequeña, y su única influencia sobre la distribución espectral de la energía de la estrella es la prominente "protuberancia de emisión" en la longitud de onda aproximada de 10 micrometros. En ausencia de polvo, la distribución espectral de energía se aproximaría a la originada por una superficie a 3300 grados Kelvin (*línea negra de trazos*). En contraste, la estrella AGL 2205 (*curva inferior coloreada*) está rodeada por una corteza de polvo tan espesa que la radiación de la estrella virtualmente no puede atravesarla. La característica espectral distintiva hacia los 10 micrometros aparece ahora como un "surco de absorción" y la radiación que emerge de las capas más externas de polvo es característica de una superficie a temperatura de sólo unos 375 grados K. La fuerte interacción de las partículas de polvo con la radiación estelar a longitudes de onda de unos 10 micrometros indica que las partículas de silicatos son un componente importante del polvo. La presión de radiación actuando sobre tan pequeñas partículas de polvo probablemente juega un importante papel en el proceso de expulsión de masa, especialmente en las estrellas frías. (La ilustración ha sido realizada por Dan Todd.)

Esas observaciones de las gigantes rojas establecieron que la fase de gigante roja en la evolución de la estrella es importante desde el punto de vista de pérdida de masa. También plantearon la pregunta de cuál es el mecanismo responsable de ella. Las velocidades hacia fuera que se observan en la realidad son en casi todos los casos mucho menores que las requeridas para que una partícula material pueda escapar del campo gravitatorio de la estrella en su superficie a menos que reciba un empuje adicional. ¿Qué es lo que lo suministra?

Ocurrió que el descubrimiento inicial de Deutsch tuvo lugar casi al mismo tiempo en que la teoría de Parker del origen térmico del viento solar estaba cosechando considerables éxitos en la explicación de ciertos fenómenos solares. Por tanto, se extendió ampliamente la hipótesis (y lo está todavía hoy) de que el mismo mecanismo de pérdida de masa debe estar en funcionamiento en las gigantes rojas. Sin embargo, esta hipótesis presenta algunas serias dificultades. Si esas estrellas están rodeadas de coronas extremadamente calientes, con una temperatura similar a la de la corona solar, es difícil entender por qué la materia no se está desprendiendo de las estrellas a una velocidad comparable a la del viento solar. En realidad, la materia de los vientos de las gigantes rojas se está moviendo a una velocidad mucho menor que la del viento solar. Por otra parte, las coronas a una temperatura más moderada (pero todavía suficientemente alta para arrancar materia de las gigantes rojas) deberían radiar mucha más energía de la que se observa que radian. En realidad, las indicaciones existentes sugieren que las más frías de las gigantes rojas no tienen corona, sino sólo una tibia envoltura llamada cromosfera que es excesivamente fría para producir expulsión de masa.

En los años sesenta entró en el panorama un nuevo elemento con el desarrollo de detectores infrarrojos sensibles y telescopios especialmente concebidos o modificados para operar con efectividad en el infrarrojo. Cuando se examinaron las porciones infrarrojas del espectro de las gigantes rojas, muchas de ellas mostraron radiación en exceso de la que podría espe-



DISTINTOS GRADOS DE TURBULENCIAS en las atmósferas de estrellas de distintas luminosidades, puesto de manifiesto en estos dos espectrogramas estelares. El espectrograma de arriba es el de la supergigante roja Alfa de Orión, extremadamente luminosa; en este negativo, todas las brillantes líneas de absorción (excepto las que proceden del propio viento estelar) aparecen difusas y borrosas debido a movimientos en gran escala en la atmósfera estelar. Las correspondientes líneas de absorción en la gigante roja Delta Ophiuchi *(abajo)*, más pequeña y menos luminosa, son mucho más marcadas, indicando menos turbulencia en la atmósfera de esta estrella. El efecto se nota particularmente en la diferencia entre las anchuras de las obscuras líneas de emisión asociadas a átomos de calcio ionizados con una sola carga *(flechas)*. La estrecha correlación entre la luminosidad de una estrella y la anchura de esas líneas de emisión fue establecida primeramente por los astrónomos de los Observatorios Hale. La noción de "turbulencia astronómica" asociada a las anchuras de tales líneas espectrales puede tener poco en común con el bien conocido fenómeno de la turbulencia en dinámica de fluidos; el verdadero carácter de esos movimientos atmosféricos y su posible papel en la producción de los vientos estelares son todavía desconocidos. (Ambos espectrogramas han sido realizados por el autor.)

rarse proceder de la superficie de la estrella. Además, la distribución espectral del exceso de radiación frecuentemente presenta una protuberancia característica. Edward P. Ney y sus colaboradores de la Universidad de Minnesota indicaron que esta frecuente característica espectral se podía explicar como emisión infrarroja procedente de pequeñas partículas sólidas de silicatos tales como el olivino (Mg_2SiO_4) que se condensaron en las amplias capas exteriores que rodean a las gigantes rojas.

Varios otros investigadores entonces en Minnesota, entre ellos N. J. Woolf y R. C. Gilman, se dieron cuenta de que las partículas sólidas podían hacer uso eficaz de la más abundante fuente de energía disponible para alimentar la pérdida de masa: la radiación procedente de la propia estrella. La esencia de la alternativa al viento estelar de origen térmico tal como la propusieron Woolf y Gilman lleva consigo la siguiente sucesión de acontecimientos. Incluso a distancia moderada de la superficie de la estrella, los pequeños "protogranos" de silicatos pueden irradiar la energía absorbida de la estrella con rendimiento suficiente para no llegar a calentarse tanto que se evaporen. De hecho, pueden crecer. La presión de radiación ejercida sobre los granos por la radiación estelar es muchas veces mayor que la presión requerida para superar la gravedad de la estrella, y los granos se aceleran rápidamente. La mayor parte del gas (principalmente hidrógeno y helio) permanece sin condensar y, por tanto, no responde directamente a la fuerza radiativa. Los granos que se mueven hacia fuera chocarán con átomos del gas no condensado, sin embargo, y comunicarán a los átomos del gas su propia cantidad de movimiento; en consecuencia, la energía se distribuye rápidamente entre la totalidad del gas. Brevemente, la fuerza radiativa sobre los granos es adecuada para arrastrar con ellos el gas no condensado alejándolo de la estrella.

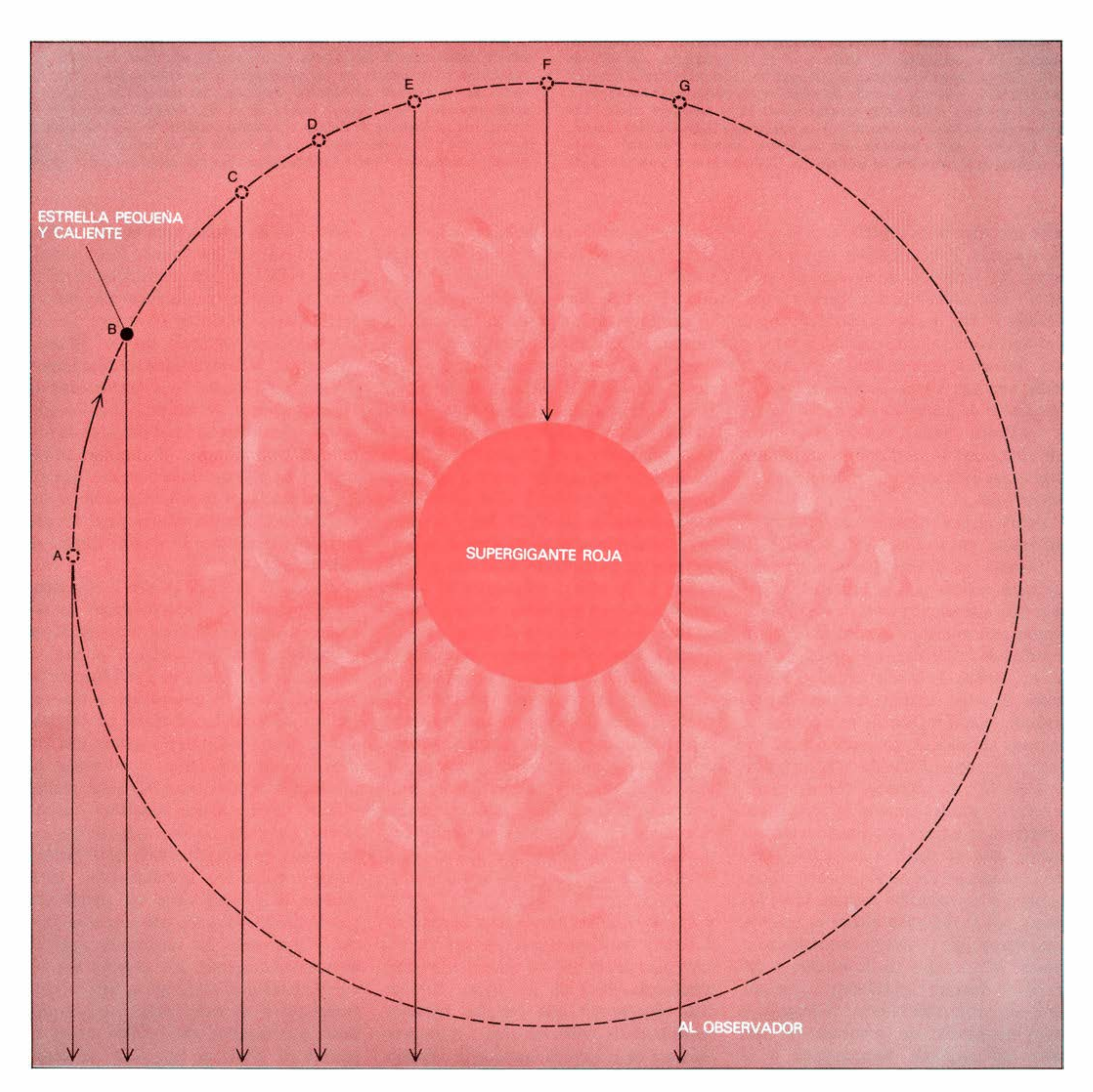
La pregunta clave en este esquema por lo demás plausible es de cuánto vale la "distancia moderada" sobre la superficie estelar a la cual se pueden condensar partículas sólidas. Si la distancia de condensación es muy grande, la mayor parte del trabajo contra la gravedad debe ser realizado por algún otro mecanismo a fin de transportar una cantidad suficiente de gas más allá del punto donde se puede condensar en forma de granos. Si este es el caso, los granos presentes en muchas de las envolturas de las gigantes rojas son simplemente un producto secundario de algún otro mecanismo que produce la expulsión, en lugar de ser la causa principal de ésta. Muchos aspectos del proceso mediante el cual las partículas sólidas se condensan a partir de un gas permanecen obscuros. La cuestión de la distancia por encima de la superficie de la estrella a la cual se pueden condensar gránulos sólidos y sobrevivir lleva consigo no sólo la intensidad y temperatura del campo de radiación que incide sobre los gránulos, sino también el conocimiento de la composición química detallada de aquéllos y de sus tamaños.

Las dos últimas propiedades se conocen muy deficientemente. Woolf y Gilman supusieron que los granos están casi totalmente libres de impurezas. En ese caso absorberían una cantidad bastante pequeña de la radiación roja e infrarroja próxima de la estrella (aunque la difusión es suficientemente efectiva, de modo que aún así, la fuerza radiativa que actúa sobre los granos es grande), pero radiarían muy efectivamente a longitudes de onda mucho mayores. El resultado es que los granos permanecerían lo suficientemente fríos para crecer y sobrevivir bastante cerca de la superficie de la estrella, del mismo modo que las casas cuyos tejados se han pintado con pintura "blanca fría", visualmente reflectora pero emisora en el infrarrojo, se mantienen relativamente frescas incluso a medio día en el verano. Un reciente trabajo realizado por K. Michael Merrill, de la Universidad de Minnesota, y Wendy A. Hagen, de la Universidad de Hawaii, sugiere, sin embargo, que los granos contienen la suficiente cantidad de impurezas para absorber tal cantidad de radiación en el infrarrojo próximo que su supervivencia en la proximidad de la superficie de la estrella es imposible. En ese caso, el mecanismo de Woolf-Gilman se hace insostenible.

Aún en la ausencia de tales impurezas, en el modelo de Woolf-Gilman se requiere un empuje adicional suministrado a la materia para que bastante de ésta se sitúe al nivel del radio de condensación de gránulos, de modo que dé lugar a una velocidad de pérdida de masa no despreciable. Woolf y Gilman sugieren que los movimientos turbulentos suministran la cantidad de movimiento adicional requerida. El sentido en que la palabra "turbulencia" ha venido siendo usada por los astrónomos ha causado desde hace tiempo desazón entre los aerodinámicos, para quienes la palabra tiene un significado bien definido indicando una corriente caótica y fluctuante. La turbulencia aparece bruscamente cuando, por ejemplo, el movimiento laminar del fluido en una tubería excede cierta velocidad crítica. Los astrofísicos, sin embargo, han tendido a usar la palabra al tratar de atmóferas estelares para explicar las anchuras de líneas, tanto de emisión como de absorción, cuando tales anchuras no se pueden atribuir a movimientos microscópicos asociados a la temperatura del gas ni a movimientos en gran escala organizados y bien conocidos, tales como la rotación en bloque de la estrella.

Cualquiera que sea la clase de movimiento gaseoso que esta "turbulencia astronómica" representa realmente, está con toda certeza presente en alto grado en las supergigantes rojas luminosas. Hacia la misma época en que Deutsch hizo su descubrimiento en Alfa de Hércules, Olin C. Wilson, otro espectroscopista de los Observatorios Hale, y V. K. Bappu, un astrónomo visitante de la India, hallaron una notable correlación entre el grado de turbulencia de la atmósfera exterior de una estrella (puesta de manifiesto por las anchuras de las líneas del calcio ionizado) y la energía total producida por la estrella. La razón física de esa correlación todavía no se conoce hoy, como tampoco la naturaleza u origen del movimiento responsable de la turbulencia.

No obstante, supongamos que se acepta que los movimientos gaseosos contribuyen a una "presión turbulenta" de la misma manera que los movimientos de las moléculas individuales contribuyen a la presión ordinaria del gas. Se puede entonces demostrar que la presión turbulenta provee suficiente apoyo al gas contra la gravedad hasta la distancia donde, cuando la condensación se produce en las circunstancias más favorables de partículas de silicatos libres de impurezas, la presión de radiación actuante sobre los granos arrastrará con ellos la cantidad de gas

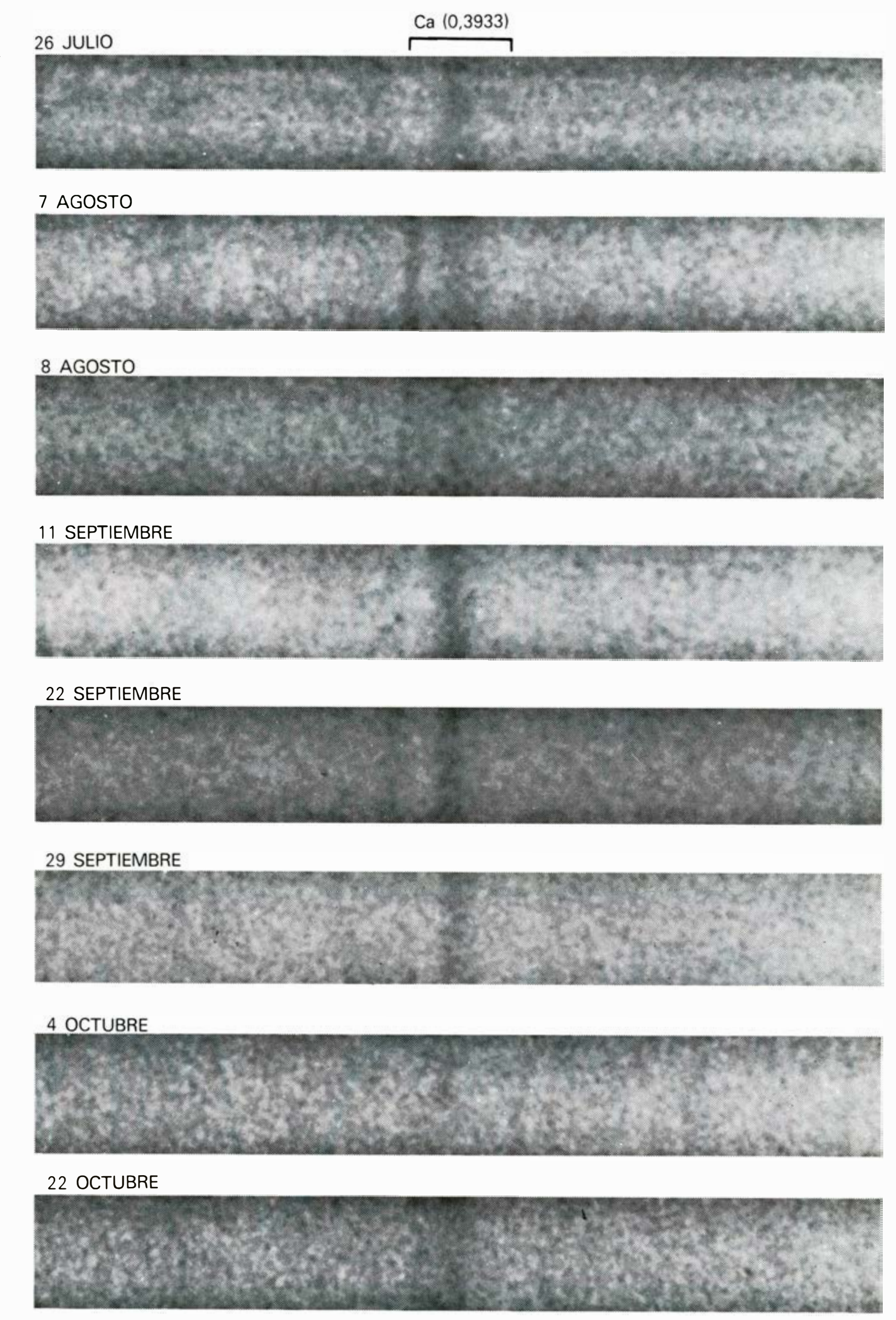


EL SISTEMA ECLIPSANTE de estrella doble llamado 31 del Cisne proporciona a los astrónomos la oportunidad de explorar sucesivamente capas cada vez más profundas de la envoltura gaseosa de una supergigante roja. El sistema consta de una estrella pequeña y caliente que gira alrededor de una supergigante roja; está situado de tal manera que la Tierra está en el mismo plano de la estrella que describe órbitas. El período del sistema es solamente de unos 10 años, lo que hace posible analizar todas las fases de la órbita. Durante la parte de la órbita desde *A* hasta *B*, la luz de la estrella pequeña llega directamente sin encontrar a la supergigante roja, pero desde *C* hasta *E* la luz pasa a través de capas de densidad creciente de la atmósfera exterior de la estrella más grande. De *E* pasando por *F* hasta *G*, la supergigante roja es opaca y la estrella pequeña y caliente queda completamente eclipsada. Aunque la distancia entre las dos estrellas, vista desde la Tierra, es tan pequeña que la luz de ellas no se puede estudiar separadamente, se sabe que la estrella pequeña y caliente aporta la mayor parte de la luz en las longitudes de onda cortas. El análisis espectroscópico del sistema durante la porción de órbita desde *C* hasta *E* indica que las capas externas de la atmósfera de la supergigante roja se componen de cierto número de nubes de gas discretas; algunas se mueven a grandes velocidades.

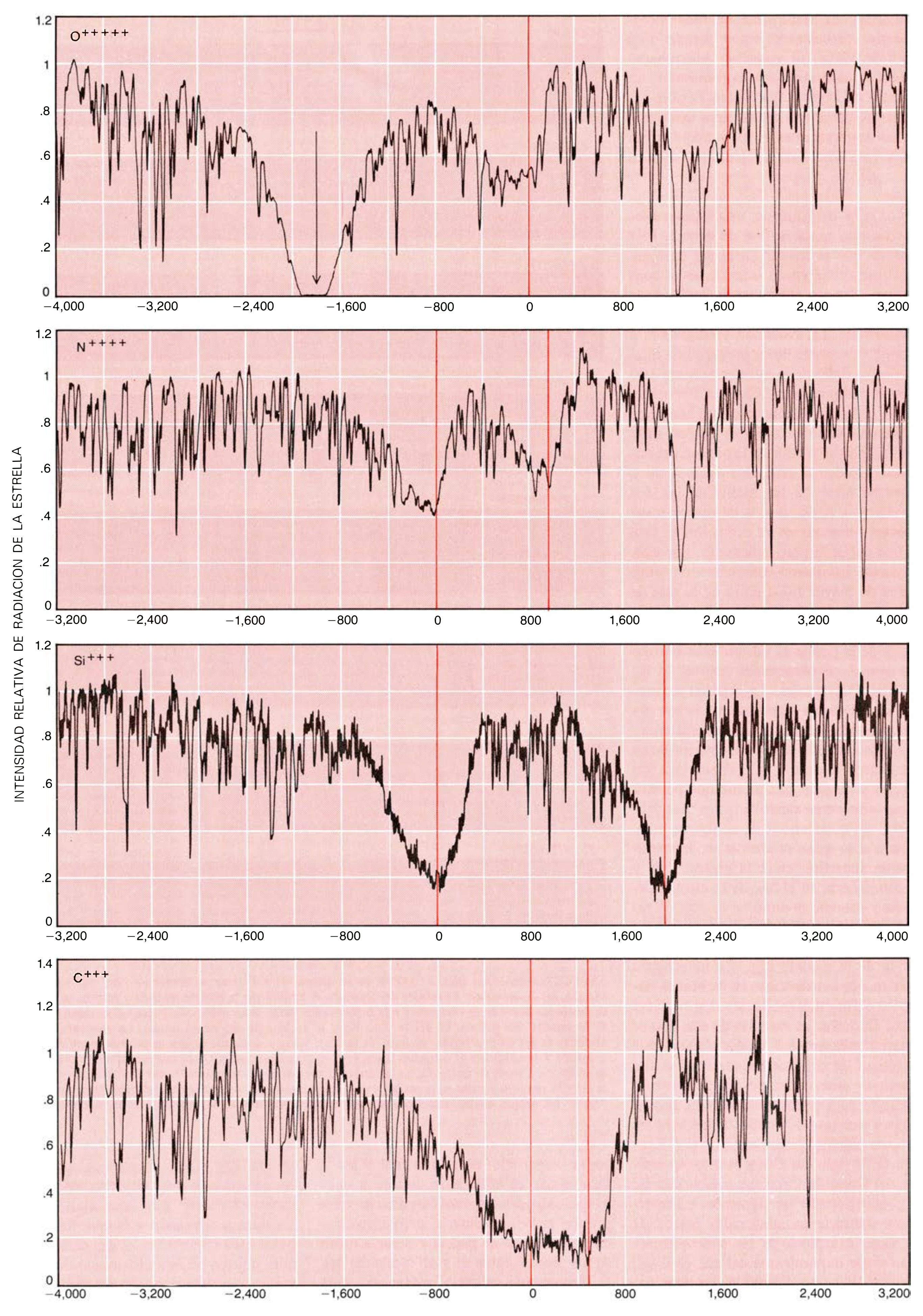
requerida. La naturaleza de esos movimientos turbulentos sigue siendo una cuestión clave no resuelta. Afortunadamente, la naturaleza nos ha provisto de un manojo de objetos que hacen posible explorar la estructura de las capas exteriores de las supergigantes rojas y adquirir así cierta idea acerca de la naturaleza de esos movimientos.

Como he mencionado, una estrella evoluciona hasta la fase de gigante roja después que la mayor parte del hidrógeno combustible en su interior se ha consumido. Cuanto mayor es la masa de la estrella, tanto más deprisa se agota el combustible. La evolución subsiguiente a gigante roja puede llevar consigo una dilatación del radio de la estrella de hasta 100 veces el radio original. Casi tan frecuentemente como se forman estrellas sencillas, se forman también estrellas dobles, cada una girando alrededor de la otra en órbitas cuyos períodos se extienden desde horas a miles de años. Si las masas de las dos estrellas son desiguales, la de menor masa quedará retrasada en su evolución en fase de una pequeña pero caliente (y, por ello, altamente luminosa) compañera en tanto que la de mayor masa entra en la fase de gigante roja. Finalmente, si el ángulo bajo el cual los astrónomos en la Tierra ven la órbita de la pareja es tal que ésta aparece "de canto", se observarán eclipses de las estrellas individuales. La especial naturaleza de tal pareja significa que la estrella más pequeña y caliente, al moverse en su órbita detrás de la envoltura exterior de su compañera gigante roja, proporciona un intenso y delgado haz de luz que penetra sucesivamente en capas cada vez más profundas de la envoltura de la gigante roja. Debido a la gran diferencia de temperatura en superficie entre la gigante roja y su compañera, en el haz de la estrella pequeña y caliente predomina la energía radiada en la parte violeta del espectro, y su luz no queda fuertemente contaminada por la de la gigante roja. Es innecesario decir que circunstancias tan especiales hacen los pares estelares de este tipo bastante raros. De todas las estrellas de este tipo se conocen escasamente media docena que satisfagan las condiciones descritas arriba y sean al mismo tiempo suficientemente brillantes para poder estudiarse en detalle.

Sin embargo, el estudio de los eclipses de estos objetos, principalmente por Kenneth O. Wright del Observatorio Astrofísico del Dominio y por sus colaboradores, ha proporcionado las siguientes e importantes indicaciones adicionales acerca de las capas exteriores de las supergigantes rojas y los movimientos del gas en ellas. Primero, el ritmo al cual la densidad del gas decrece al aumentar la distancia a la superficie de la gigante roja (definiendo como "superficie" el nivel al cual el gas se hace opaco) es muy lento, mucho más de lo que se podría esperar fundándose en la presión gaseosa ordinaria, pero aproximadamente lo que se podría esperar a partir de los movimientos en gran escala del gas. Evidentemente, algún fundamento debe tener el ingenuo concepto de presión turbulenta usado por los astrónomos. Segundo, hay claras pruebas de movimientos gaseosos de muy alta velocidad en esas capas exteriores, aún más altas que las medidas por Wilson y Bappu. Tercero, y quizá más importante, el gas detectado en tales objetos no está distribuido uniformemente, sino amontonado en ciertos lugares. Este fenómeno no es desusado en astrofísica; por ejemplo, el gas interestelar



ESPECTROGRAMAS DEL ECLIPSE en el sistema 31 del Cisne realizados en 1961 por Kenneth O. Wright, del Observatorio Astrofísico del Dominio. A medida que la estrella pequeña y caliente se mueve en su órbita alrededor de su compañera roja supergigante, actúa como una sonda de las tenues capas exteriores de la estrella más grande, en donde tiene lugar la aceleración del viento estelar. La presencia de nubes discretas de gas en esta región, en lugar de un flujo suave y uniforme de gas, se pone de manifiesto por la aparición y desaparición de estrechas líneas de absorción *(líneas obscuras en esta reproducción positiva),* **que se atribuyen a vapor de calcio** *(Ca)* **en las nubes. Unos dos meses después de tomar el último espectrograma, la estrella pequeña y caliente se ocultó tras el cuerpo opaco de la estrella supergigante. Durante esta fase "total" del eclipse estelar, solamente se registró luz procedente de la superficie de la supergigante roja.**


O+++++
N++++
Si+++
C+++
1.2
1
.8
.6
.4
.2
0
1.4
−4,000
−3,200
−2,400
−1,600
−800
0
800
1,600
2,400
3,200
4,000
INTENSIDAD RELATIVA DE RADIACION DE LA ESTRELLA
VELOCIDAD DE GAS RESPECTO A LA ESTRELLA (KILOMETROS POR SEGUNDO)

está frecuentemente concentrado en nubes. Además, la existencia de nubes o filamentos en las capas más externas de las gigantes rojas difícilmente sorprendería a quienes estudian la corona solar, ya que ellos tienen completa familiaridad con la existencia de nubes de gas frío: las protuberancias solares, que algunas veces son estacionarias y otras se mueven a grandes velocidades, son nubes de gas frío interpuestas en la corona solar, mucho más caliente.

La implicación de esas observaciones es que el mecanismo que produce los suaves vientos que soplan desde las gigantes rojas es mucho más complicado de lo que los teóricos, en su afán de reducir la naturaleza a una sencillez comprensible, han supuesto. El panorama que está comenzando a emerger es que tanto la actividad productora de nubes, semejante a los procesos que operan en las protuberancias solares (quizás asociados a un gas enrarecido muy caliente que confina a dichas nubes), como la condensación de gránulos en las nubes frías desempeñan ambas papeles importantes en los procesos de pérdida de masa que actúan en las gigantes rojas.

Hay una clase enteramente diferente de estrellas de las que también se sabe que están continuamente expulsando materia hacia el espacio interestelar, aunque el fenómeno es completamente diferente en algunos respectos. Antes de hablar de esos objetos procede decir unas palabras acerca de los efectos de la presión de radiación. Si la presión de radiación que actúa sobre partículas sólidas es realmente la explicación correcta de los vientos estelares en las gigantes rojas, podría uno preguntarse por qué la muy pequeña fracción de gas que se condensa en gránulos –sólo alrededor de 0,1 por cien del gas no condensado– es más efectiva que el propio gas. La explicación es que las abundantes especies de átomos en la fase gaseosa atómica (hidrógeno, helio, oxígeno, carbono, nitrógeno y neon) son completamente transparentes a la radiación en las regiones amarilla, roja e infrarroja del espectro, donde las gigantes rojas radian la mayor parte de su energía. Esos átomos son absorbentes efectivos solamente en la región ultravioleta del espectro, donde las gigantes rojas radian una cantidad despreciable de energía. En contraste, los gránulos pueden interceptar luz roja y radiación infrarroja con un rendimiento bastante alto. Los granos tienen la ventaja suplementaria de ser capaces de absorber luz en un ancho intervalo de longitudes de onda en lugar de limitarse a las estrechas bandas de absorción características de un gas en estado atómico.

Sin embargo, estas consideraciones plantean la pregunta de si las estrellas que producen efectivamente grandes cantidades de radiación ultravioleta (esto es, estrellas con temperatura en superficie muy alta) no podrían también ser capaces de expulsar materia por medio de las fuerzas radiativas ejercidas por la radiación ultravioleta sobre los átomos del gas común. Las estrellas que son claras candidatas para tal proceso son las progenitoras de las supergigantes rojas muy luminosas, estrellas que no han cesado completamente de quemar hidrógeno en su interior y están, por tanto, en, o cerca de, la "secuencia principal". Tales estrellas tienen radios considerablemente menores que los de las supergigantes rojas en las que se convertirán. Como resultado, se necesita 100 veces más energía para extraer materia de sus superficies que la que es necesaria en el caso de las supergigantes rojas, pero eso queda compensado por la intensa radiación cerca de la superficie de estas estrellas.

Durante muchos años, los espectroscopistas, usando telescopios situados en la Tierra, habían sospechado que la pérdida substancial de masa podría ser una característica de esas estrellas. Sin embargo, la porción ultravioleta de los espectros, donde habría de observarse la absorción importante, queda bloqueada por la atmósfera terrestre. En 1967, Donald C. Morton, de la Universidad de Princeton, logró obtener espectrogramas ultravioleta de varias estrellas calientes mediante instrumentos transportados en un cohete por encima de la atmósfera. Los espectrogramas mostraban líneas de absorción cambiadas de sitio, de carácter similar a las observadas en las gigantes rojas excepto que la velocidad de flujo saliente era de 100 a 200 veces mayor que en las gigantes rojas. Morton llamó huracanes estela-

PERFILES ESPECTRALES del gas que se aleja de la estrella Tau del Escorpión, obtenidos por John B. Rogerson, Jr., y H. Lamers usando un espectrómetro montado en el satélite *Copernicus*. La líneas verticales de color muestran la posición que tendría en el espectro de la atmósfera de la estrella cada uno de los cuatro pares de líneas de absorción atómica si el gas estuviera en reposo. (El hecho de que las líneas aparezcan en pares es una propiedad intrínseca de esas clases particulares de iones y no tiene nada que ver con el fenómeno de la pérdida de masa estelar.) Como resulta evidente en las trazas, los anchos valles de absorción se extienden a grandes velocidades negativas, que en el caso de iones de carbono triplemente ionizados (C^{+++}) alcanzan al menos 1600 Kilómetros por segundo, bien por encima de la velocidad requerida para que la materia escape de la superficie de la estrella (unos 1150 km/seg.) Los valles de absorción asociados a iones de oxígeno a los que se ha arrancado cinco electrones (O^{+++++}) parecen indicar la presencia de una región comparativamente caliente cerca de la base de la corriente que se aleja; la temperatura de tal región sería de unos 200.000 grados K. La fuerte línea de absorción a la derecha de los valles del O^{+++++} *(flecha negra)* es atribuible a átomos de hidrógeno en el espacio interestelar y no está asociada a la estrella.

res a esas tremendas corrientes. En contraste con las suaves brisas de las gigantes rojas, los vientos de las estrellas calientes indican velocidades suficientemente altas para el escape de materia aunque ésta se encuentre muy próxima a la superficie de la estrella. Queda todavía la cuestión de cuál es el mecanismo que produce las tremendamente altas velocidades que se observan, que en algunos casos alcanzan el uno por cien de la velocidad de la luz.

Como se ha sugerido arriba, esas estrellas calientes son candidatos principales para ejemplos de pérdida de masa causada por la presión de radiación actuando sobre las líneas de absorción de los abundantes elementos en el extremo ultravioleta del espectro. El primer modelo teórico y cuantitativo de este mecanismo se debe a Leon B. Lucy, de la Universidad de Columbia, y Philip M. Solomon, de la Universidad del Estado de Nueva York en Stony Brook. Una característica interesante del mecanismo es que la fuerza ejercida por la radiación en cualquier punto de la corriente depende fuertemente de la velocidad de la materia por debajo de ese punto. La razón es que las líneas de absorción de los elementos comunes en el ultravioleta son tan intensas que atenuarán rápidamente la radiación en esas longitudes de onda específicas si toda la materia se estuviera moviendo a la misma velocidad. Sin embargo, si hay un gradiente suficiente en la velocidad de la materia, a causa del corrimiento Doppler, los átomos en capas sucesivamente más altas encontrarán radiación "fresca", no atenuada, que puede continuar acelerando la materia. De esta manera, los átomos continúan escapando de la "sombra" de las partículas situadas más abajo. Por supuesto, cuanto más rápido es el flujo, tanto mayor es la cantidad de movimiento que debe extraerse del campo de radiación de la estrella y emplearse en impulsar el flujo. De manera análoga, cuanto más rápido sea el flujo, tanto mayor será la cantidad de movimiento que requiere. A causa de esta particularidad compensadora, Lucy y Solomon mostraron que el ritmo de pérdida de masa atribuible a este mecanismo se puede estimar independientemente de la velocidad del viento. En efecto, es aproximadamente igual al número de líneas intensas de resonancia ultravioleta multiplicado por la luminosidad de la estrella y dividido por el cuadrado de la velocidad de la luz. (Una línea de resonancia es aquella en que el más bajo de los dos niveles de energía entre los cuales salta el electrón cuando absorbe luz es el nivel de energía más bajo accesible al electrón.)

Desde el trabajo inicial de Morton y de Lucy y Solomon se han realizado avances en la comprensión de los huracanes estelares tanto en la teoría como en la observación. John I. Castor y sus colaboradores de la Universidad de Colorado han construido modelos teóricos elaborados y detallados, basados en el mecanismo de Lucy y Solomon. Sus modelos pueden ahora compararse con datos precisos obtenidos por un grupo de Princeton usando el espectrómetro del satélite *Copernicus*.

Es justo decir que ciertamente existe concordancia cualitativa entre las predicciones del modelo y las observaciones. Hay, sin embargo, una notable anomalía en las observaciones que se ha convertido en punto de reunión para un grupo de astrónomos, dirigidos por Richard N. Thomas, del Institut d'Astrophysique de París, que no están convencidos de que la explicación de la pérdida de masa como consecuencia de la presión de radiación actuando sobre las líneas atómicas de absorción sea toda la historia, ni siquiera la más importante parte de ella. La anomalía fue encontrada por primera vez en la estrella Tau del Escorpión por John B. Rogerson, Jr., y H. Lamers, que usaron datos del *Copernicus*.

Lo que Rogerson y Lamers hallaron fue líneas de absorción procedentes del oxígeno en estado altamente ionizado. Este alto grado de ionización (en el cual han sido arrancados los cinco electrones orbitales más externos) indicaba bien un flujo de radiación, anormalmente grande, en la parte del espectro de la estrella correspondiente a los rayos X blandos (parte del espectro no accesible al *Copernicus*) o bien una temperatura anormalmente alta en algunas regiones del flujo, del orden de 200.000 grados. La última posibilidad recuerda a la corona solar, que presenta una débil emisión procedente de materia altamente ionizada producida por un gas caliente, que a su vez juega un papel crucial en la producción del viento solar. Hasta este descubrimiento se suponía que esas estrellas calientes carecían de corona. (Se consideran calientes en el sentido de que las temperaturas en su superficie visible varían de 20.000 a 50.000 grados, comparadas con el margen de 5000 a 6000 grados de las estrellas semejantes al Sol y con el de 2000 a 4000 grados de las gigantes rojas.) Este descubrimiento provocó una viva controversia sobre si la alta ionización se debía a un exceso de rayos X blandos o a una corona caliente. El trabajo más reciente debido a Rogerson y Lamers apoya fuertemente el punto de vista de que el alto grado de ionización es producido por una corona moderadamente caliente a través de la cual fluye el gas. Sin embargo, la controversia acerca de si la corona es simplemente un producto secundario, sin demasiada importancia, del proceso de presión de radiación propuesto por Lucy y Solomon o, por el contrario, desempeña un papel importante en el proceso de pérdida de masa, está todavía sin resolver.

Resumiendo, se sabe ahora que el flujo constante de materia a ritmos de pérdida de masa comparables, aunque a velocidades considerablemente diferentes, es un fenómeno frecuentemente hallado tanto entre las estrellas calientes luminosas como entre las también luminosas pero frías gigantes rojas. Los flujos son probablemente lo bastante masivos en ambos casos para producir efectos importantes en la evolución estelar y el balance de masa entre estrellas y medio interestelar, pero las estimas de los ritmos de pérdida son todavía demasiado inciertas para poder decir mucho más. El mecanismo de presión de radiación actuando sobre las líneas de absorción del gas, debido a Lucy y Solomon, parece la teoría más satisfactoria hasta ahora propuesta para explicar la pérdida de masa de las estrellas calientes, pero deberá modificarse para explicar el anormalmente alto grado de ionización hallado en el flujo. La solución de este particular rompecabezas vendrá probablemente cuando la sensibilidad de los telescopios que usan rayos X, radiación infrarroja y ondas de radio mejore un poco. Las observaciones resultantes deberán resolver la cuestión de hasta qué punto las estrellas calientes tienen coronas calientes y aclarar el papel que las coronas juegan en los procesos de pérdida de masa.

En las gigantes rojas, la causa de los vientos permanece todavía obscura y es probable que resulte complicada: presión de radiación actuando sobre los granos, fuentes de gas con aspecto de promontorios eyectados en períodos de actividad atmosférica semejantes a las fulguraciones solares y coronas calientes y de baja densidad con burbujas frías ocluidas en ellas, todas esas características pueden jugar papeles importantes. También aquí las observaciones en las nuevas regiones del espectro electromagnético abiertas a los astrónomos en las pasadas dos décadas pueden ser decisivas. Se acaba de lanzar un satélite desarrollado por un consorcio de Europa y los Estados Unidos dotado de un espectrómero ultravioleta que da un apreciable aumento de sensibilidad sobre el del *Copernicus*. Con seguridad proporcionará valiosa información adicional sobre la extensión de las coronas alrededor de las gigantes rojas. Si esta nueva herramienta no es todavía apropiada a su tarea, la cuestión del origen estelar, como tantas cuestiones fundamentales formuladas por los astrónomos de hoy, deberá esperar hasta que el indicio decisivo sea proporcionado por el espectrómetro de muy alta resolución a bordo del observatorio orbital que se espera sea lanzado a comienzos de la década de 1980.

Los homínidos de Turkana Oriental

En esta región ribereña del lago Turkana, al noroeste de Kenia, se ha hallado un tesoro de fósiles de miembros primigenios del género Homo y de sus parientes cercanos, que se remontan a 1,5 o más millones de años

Alan Walker y Richard E. F. Leakey

El continente africano es rico en restos fosilizados de mamíferos extintos. Uno de los depósitos más ricos de dichos restos está situado en Kenia, cerca de su frontera con Etiopía. El primer europeo que exploró esa zona fue un geógrafo del siglo pasado, el conde Samuel Teleki, quien llegó hasta la difícil ribera oriental de un lago salado no cartografiado, a principios de 1888. Ejerciendo su prerrogativa de explorador, bautizó esa extensión acuática de 6475 kilómetros cuadrados con el nombre del hijo y heredero de Francisco José, emperador de Austria, el archiduque Rodolfo (quien al cabo de un año se suicidó en el comentado episodio de Mayerling). La expedición de Teleki pasó obviamente por un importante hito de la ribera del lago, el promontorio de Koobi Fora, durante la última semana de marzo. Sus miembros tomaron notas acerca de la geología local y hasta recogieron conchas fósiles, si bien no advirtieron los restos de mamíferos.

El nombre de Teleki se ha ido olvidando en la historia, y hasta el nombre del lago ha sido cambiado por el gobierno de Kenia, de lago Rodolfo a lago Turkana. Pero la zona de Koobi Fora es todavía hoy famosa entre quienes estudian los orígenes del hombre. Entre sus fósiles de mamífero figuran los restos parciales de unos 150 ejemplares de homínidos, parientes primitivos del hombre moderno. Representan la agrupación más abundante y variada de fósiles de homínidos primigenios que se haya encontrado hasta la fecha.

Los estratos de fósiles de Turkana Oriental podrían haber sido descubiertos en cualquier ocasión después de que los reconociera Teleki. Pero hasta 1967 esos depósitos no llegaron a tener notoriedad. En aquel entonces el gobierno de Etiopía autorizó a un grupo internacional a estudiar la geología de un remoto rincón del sur del país: el valle del río Omo, tributario del lago Turkana. La erosión sufrida por la zona ha dejado al descubierto estratos sedimentarios que se remontan desde el Pleistoceno hasta el Plioceno, es decir, desde hace más o menos un millón hasta unos cuatro millones de años atrás.

Las vituallas para los campamentos de Omo fueron transportadas por avión sobrevolando la zona del Turkana Oriental, y en uno de esos viajes uno de nosotros (Leakey) observó que parte del terreno se componía de capas sedimentarias que habían sido disecadas por corrientes de agua y que al parecer podían contener fósiles. Una breve incursión ulterior en helicóptero reveló que los sedimentos denudados contenían no sólo fósiles de mamíferos, sino utensilios de piedra. A este reconocimiento le siguió, en 1968, una expedición a esa zona, vasta, cálida e inhospitalaria. De un total de varios cientos de kilómetros cuadrados, la expedición localizó una zona de unos ochocientos kilómetros cuadrados de sedimentos portadores de fósiles, principalmente en las cercanías de Koobi Fora, en Ileret y al sur de la bahía de Allia. La expedición halló también los restos fósiles de muchas clases de mamíferos, algunos de ellos en un estupendo estado de conservación. Sólo en la categoría de los homínidos fueron decepcionantes los hallazgos: un total de sólo tres mandíbulas, todas muy deterioradas por la intemperie. Sin embargo, la riqueza global de los depósitos de fósiles hacía evidente que valía la pena continuar las prospecciones.

La gran tarea de establecer el contexto geológico de los fósiles y de los utensilios descubiertos en Turkana Oriental comenzó en 1969. El trabajo en dicha temporada culminó con la excavación de los primeros utensilios de piedra que se hallaron allí en secuencias estratigráficas y con el descubrimiento de dos cráneos de homínidos primitivos. Con estos descubrimientos se empezó a reconocer la enorme importancia de la zona para el estudio de la evolución humana.

Se estableció una organización formal: el Proyecto de Investigación de Koobi Fora, que funciona dirigido conjuntamente por uno de nosotros (Leakey) y Glynn Isaac, de la Universidad de California en Berkeley. En los años transcurridos desde su fundación, el proyecto ha reunido a investigadores de numerosos países y que representan muchas y diferentes disciplinas: geología, geofísica, paleontología, anatomía, arqueología, ecología y tafonomía. (La tafonomía es una nueva disciplina que estudia los procesos que convierten a comunidades de plantas y animales vivos en colecciones de fósiles.) La interacción de especialistas se ha convertido en un aspecto que da especial vigor al proyecto, por cuanto los investigadores han ido haciéndose cada vez más conscientes de la peculiar perspectiva (y también de las limitaciones) de las ramas científicas diferentes de la propia.

El proyecto abarca una zona que va desde la frontera entre Kenia y Etiopía, por el norte, hasta un lugar de la bahía de Allia, en donde la superficie terrestre es de origen volcánico. Su límite occidental es la ribera lacustre, y la oriental queda limitada por otro afloramiento volcánico. Nuestro campamento base está situado en el propio promontorio de Koobi Fora, una lengua de tierra que penetra varios cientos de metros en el lago. Cada una de las tres principales zonas de sedimentos fosilíferos posee sus propios lindes naturales; cuando se los ve desde el aire, aparecen como manchas pálidas en medio del terreno volcánico, más obscuro. Para fines de referencia se las ha dividido en unidades de menor extensión, identificadas por números en los mapas del proyecto, y que en el terreno mismo se distinguen fácilmente por su vegetación, ramblas y rasgos similares.

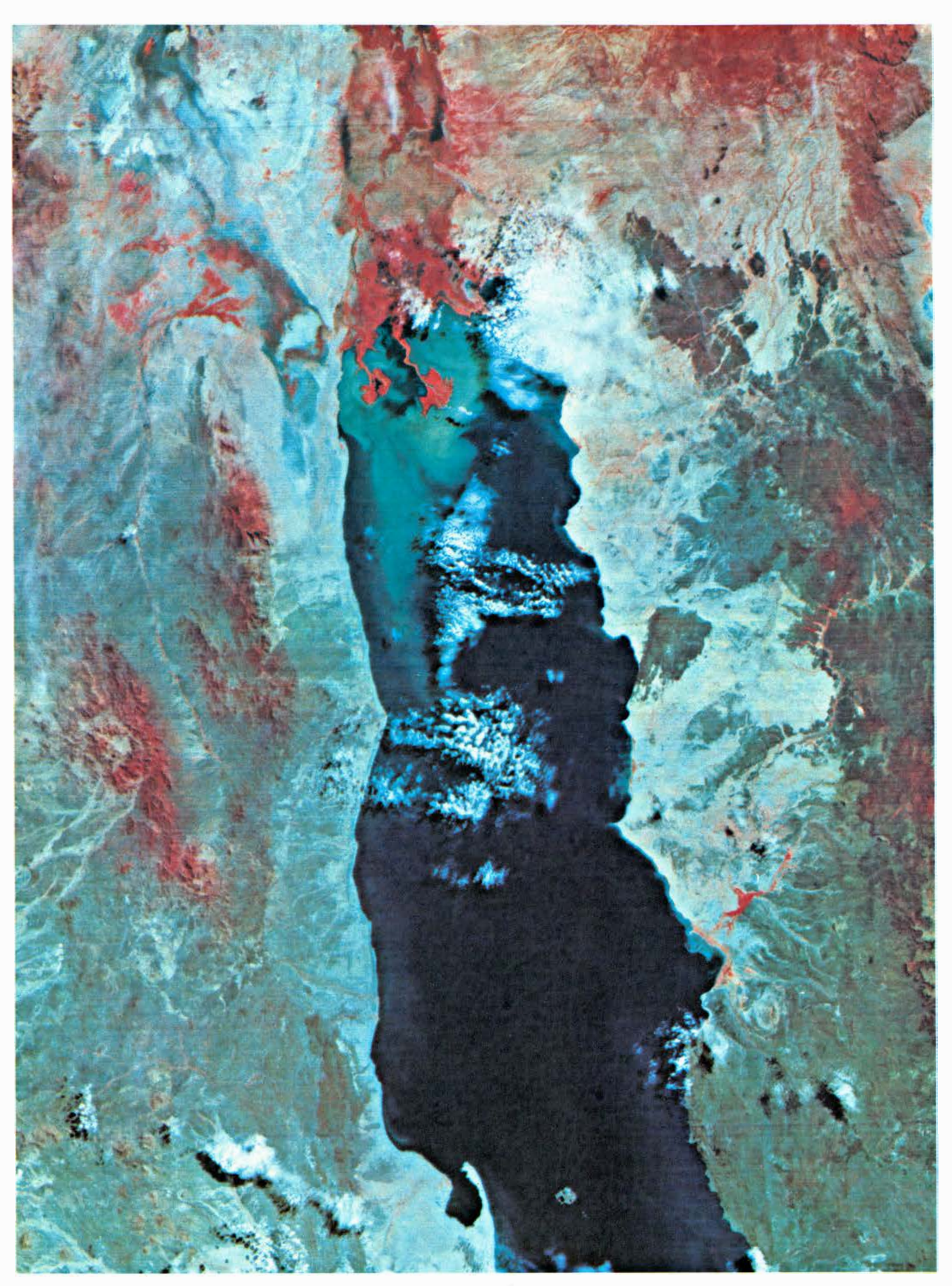
En estudios como éste es de importancia capital elaborar un marco de referencia cronológico que permita colocar en sus correctas posiciones relativas a los fósiles encontrados. La construcción de ese marco corresponde a los geólogos y geofísicos del proyecto. La geología de Tur-



GRUPO DE PROSPECCION SUPERFICIAL del Proyecto de Investigación de Koobi Fora, trabajando en la zona de Ileret, en Turkana Oriental. El hallazgo de un hueso mandibular de homínido en la superficie exige recolectar y tamizar la capa superficial de tierra y de roca sueltas, en busca de más fragmentos de fósil. Los geólogos del grupo registran al mismo tiempo la posición estratigráfica del afloramiento y levantan un hito indicador del yacimiento.



HUESO MANDIBULAR FOSIL, fotografiado donde se encontró, expuesto sobre la superficie por erosión de la roca sedimentaria en que yace. Se trata de la mandíbula fragmentada de un miembro robusto del género *Australopithecus*; se conservó por su entierro casual en unos sedimentos, lo que aconteció hace unos dos millones de años, aproximadamente. Las mandíbulas como ésta son tan recias que un número no pequeño de ellas ha sobrevivido como fósiles.



LAS ZONAS RICAS EN FOSILES, de Turkana Oriental, aparecen como manchones pálidos en una imagen de la región obtenida via satélite. Los deltas del río Omo, procedente de Etiopía, asoman al extremo norte del lago Turkana (antes lago Rodolfo). El promontorio corto y estrecho que sobresale de la ribera oriental del lago es Koobi Fora, en donde está situado el campamento base de los investigadores de campo del proyecto. La foto es del satélite *Landsat 2*.

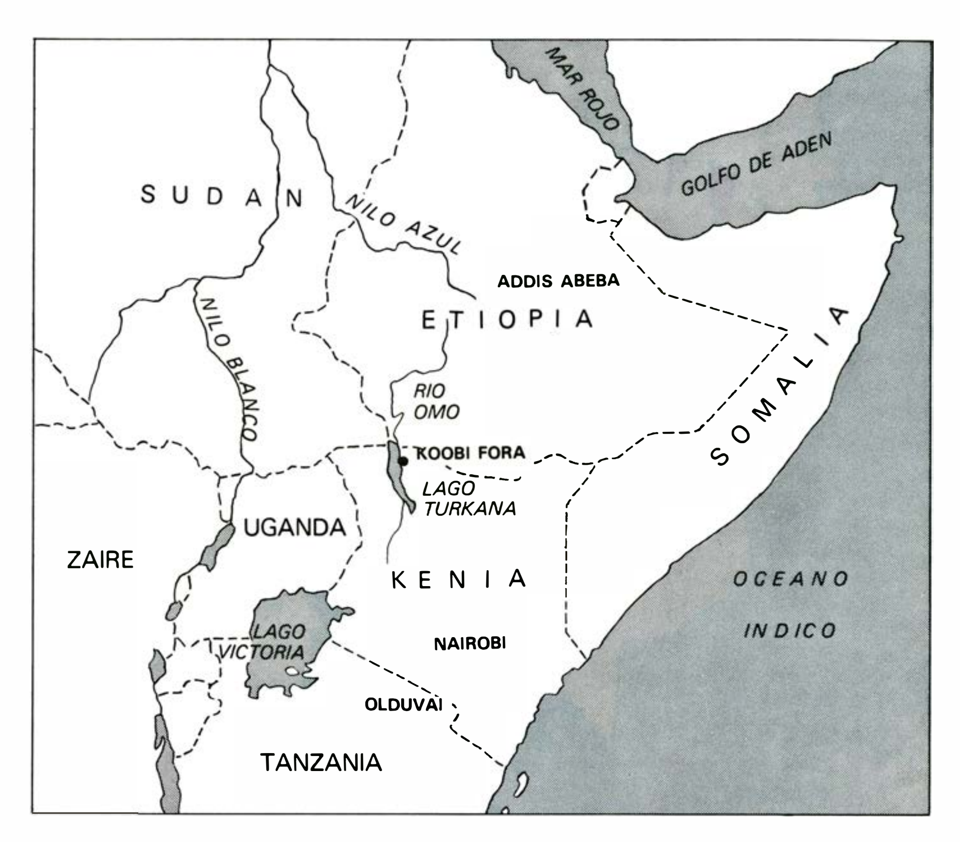
kana Oriental es lineal a grandes rasgos, pero sumamente compleja en muchos de sus detalles locales. Entre los factores responsables de su complejidad hay unos bruscos desplazamientos laterales en la composición de los estratos sedimentarios denudados, discontinuidades, fallas en las que participan unos desplazamientos más bien pequeños y, sobre todo, la ausencia de muchos de los sedimentos de toba volcánica: capas de ceniza que desempeñan un papel esencial en la datación de los estratos.

La difícil tarea de confeccionar mapas geológicos y hacer correlaciones estratigráficas la han efectuado muchos de nuestros colegas, pero principalmente Bruce Bowen, de la Universidad del Estado de Iowa, en colaboración con Ian Findlater, del Instituto Internacional Louis Leakey de Prehistoria Africana, de Nairobi, Kay Behrensmeyer, de la Universidad de Yale, y Carl F. Vondra, de la citada Universidad de Iowa.

Sin embargo, las complejidades han impedido situar con exactitud algunos de los más importantes fósiles de homínidos en el marco de referencia estratigráfico establecido por los geólogos. En tales casos hemos asignado provisionalmente fases cronológicas a los especímenes según criterios no estratigráficos.

Los sedimentos ricos en fósiles yacen sobre rocas más antiguas de origen volcánico. Los sedimentos mismos son de varias clases, depositados en diferentes entornos antiguos tales como lechos de arroyo y sus llanuras aluviales, fondos lacustres, deltas de río y antiguas orillas lacustres. La mayoría de los estratos se inclinan hacia el actual lago Turkana. En el pasado ocurrió con frecuencia que, por la ribera occidental de la antigua cuenca del lago, se adentraron prolongaciones de diversos deltas y planicies costeras; estas intrusiones se alternaron con períodos en los cuales las aguas del lago anegaron una mayor extensión hacia el Este. Lo cual ha dado por resultado una complicada interdigitación de sedimentos lacustres y fluviales.

La base principal para correlacionar los diversos estratos es la presencia de capas de toba interestratificadas; el material volcánico fue arrastrado periódicamente por el agua desde el terreno septentrional y oriental hacia el borde de la cuenca del lago. Algunas de las capas de toba son extensas y otras no lo son. Las incertidumbres en cuanto a la correlación entre las capas de toba de diferentes emplazamientos son máximas en las zonas de Koobi Fora y de la bahía de Allia, que son las más distantes de las fuentes de la erosión de la ceniza volcánica. Al mismo tiempo, las mediciones mediante isótopos



REGION DE KOOBI FORA en Turkana Oriental, que se halla en las proximidades de la frontera entre Kenia y Etiopía. El material fósil allí recogido se lleva luego a Nairobi para su restauración y análisis.

permiten efectuar la datación de las rocas volcánicas, lo cual confiere especial importancia a los estratos de ceniza.

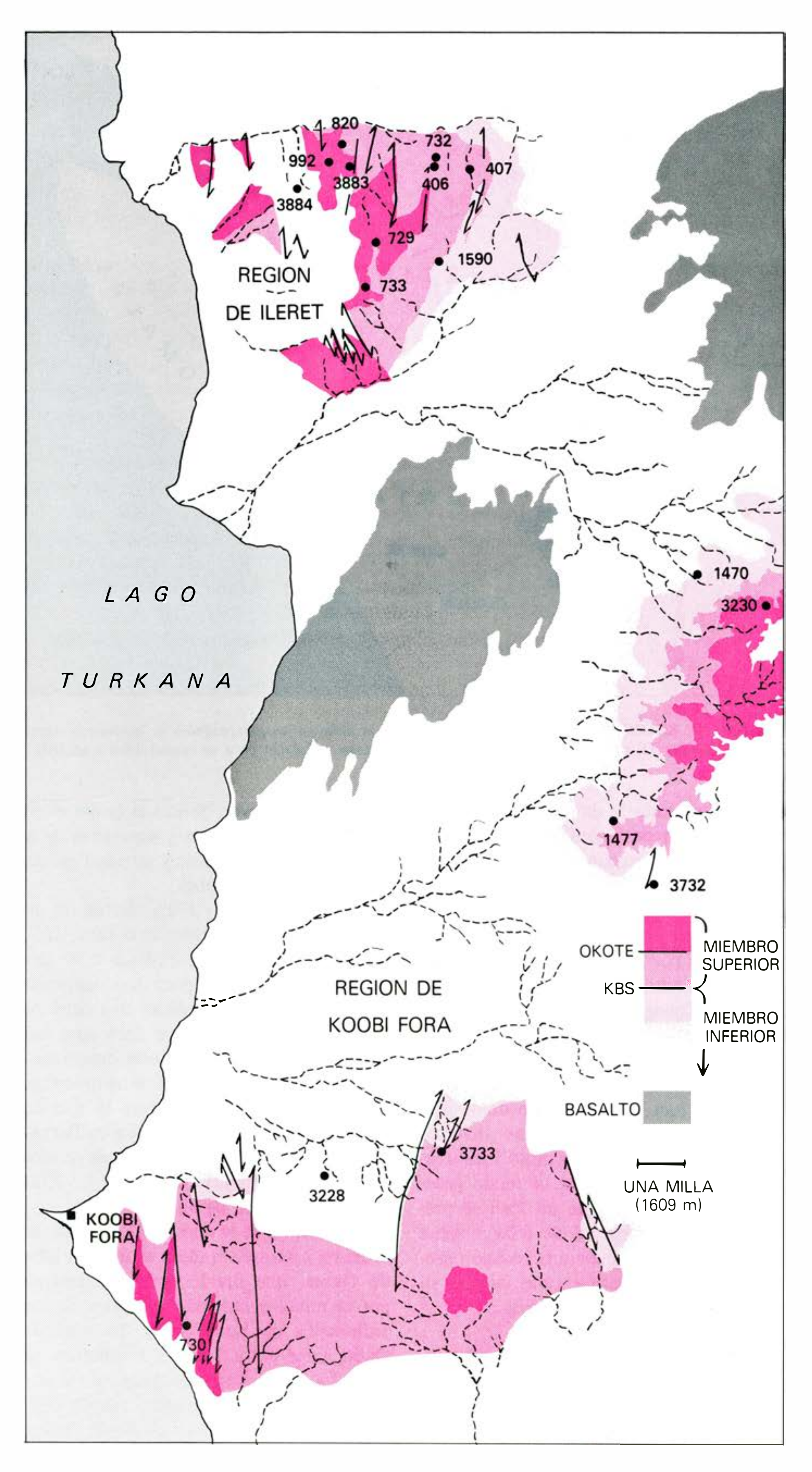
Los estudios de datación de la toba, basados en la desintegración de potasio radiactivo en argón, han sido realizados en su mayoría por Jack Miller, de la Universidad de Cambridge, y Frank J. Fitch, del Birkbeck College de Londres. Unos estudios de la orientación magnética de ciertas partículas de la ceniza volcánica, y de las huellas de fisión en trocitos de zirconio de la misma, han proporcionado datos cronológicos independientes. Las diversas mediciones no son en absoluto inequívocas, pero puede afirmarse de modo general que el hecho de que un fósil se presente bajo una capa tal de toba y sobre otra, establece al menos una posición cronológica relativa para él, aun cuando su edad precisa siga siendo dudosa.

Hay cinco capas principales de toba señalizadoras. La más antigua es la toba de Surgaei, que marca un límite entre los sedimentos de Kubi Algi situados bajo ellas y los de Koobi Fora que la cubren. La siguiente capa de toba divide al miembro inferior de la formación sedimentaria de Koobi Fora aproximadamente por la mitad; se trata de la toba de Tulu Bor, de 3,2 millones de años de antigüedad. La capa siguiente, la toba KBS, lleva este nombre por el afloramiento en donde se la reconoció por primera vez: el yacimiento Kay Behrensmeyer. Señala el límite entre los miembros inferiores y superiores de la Formación Koobi Fora, y su edad exacta es objeto de discusiones.

En 1970, Miller y Fitch efectuaron un análisis de potasio/argón de la toba KBS, según el cual ésta tiene 2,61 (±0,26) millones de años. Hace poco han realizado nuevos cálculos que señalan una edad de 2,42 (±0,01) millones de años para esa toba. Al mismo tiempo, una determinación cronológica basada en otras muestras de KBS, realizada por Garniss H. Curtis, de la Universidad de California en Berkeley, arroja dos edades mucho más recientes: 1,82 (±0,04) millones y 1,60 (±0,05) millones de años.

Por encima de la anómala toba KBS, la próxima capa señalizadora es la de la toba de Okote, que divide aproximadamente por la mitad el miembro superior de los sedimentos de Koobi Fora. La toba de Okote tiene entre 1,6 y 1,5 millones de años. La quinta capa señalizadora –la superior– que marca a grandes rasgos el límite entre los sedimentos de Koobi Fora y los sedimentos suprayacentes de Guomde, es la toba de Chari-Karari, cuya edad oscila entre 1,3 y 1,2 millones de años.

El motivo para que presentemos con tanto detalle la estratigrafía radica en que los fósiles de homínidos descubiertos hasta ahora en Turkana Oriental están emparedados entre la toba de Tulu Bor, por el extremo más antiguo de la columna



LOS FOSILES DE TURKANA ORIENTAL se encuentran en una compleja interdigitación de rocas sedimentarias, unas procedentes de ribera lacustre y de delta fluvial y otras de lecho de río, depositadas durante períodos alternativos de intrusión del lago y de acumulación de tierra. Las principales capas geológicas señalizadoras son depósitos de tobas volcánicas que fueron arrastradas por el agua, desde el este y el norte, a lo ancho de la región. De las tres principales zonas con fósiles, una es la región de Ileret *(arriba)* y otra es la de Koobi Fora *(abajo)*. No se muestra la bahía de Allia. El mapa está basado en el trabajo de Ian Findlater; los números identifican algunos de los hallazgos de fósiles en ambas regiones. Las fallas geológicas del conjunto se señalan mediante símbolos convencionales. Se identifica asimismo *(color)* los estratos sedimentarios del miembro superior y de parte del miembro inferior de la Formación Koobi Fora. Estos estratos están separados por dos capas señalizadoras de toba volcánica: el complejo Okote y el KBS.

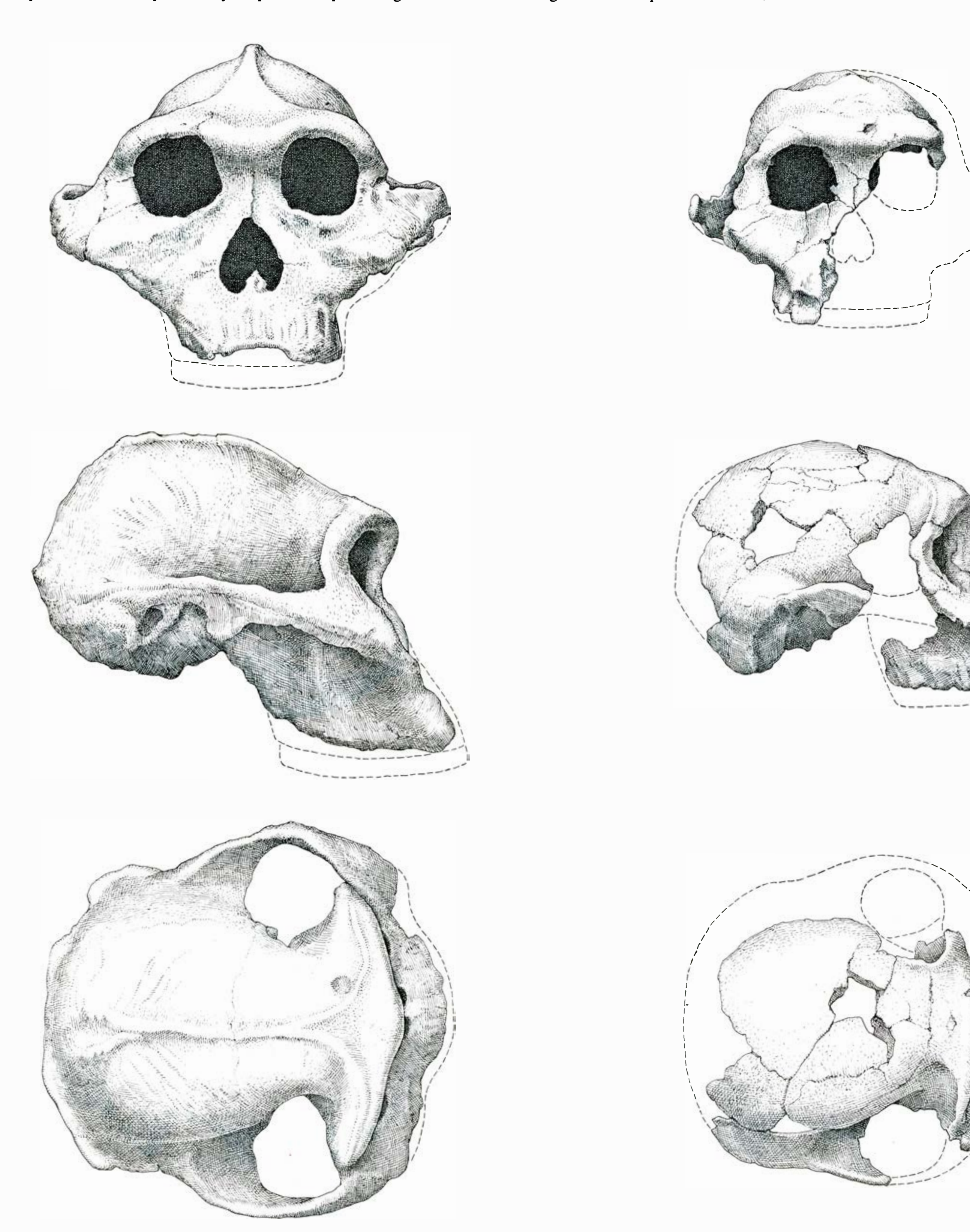
geológica, y la toba de Chari-Karari por el más reciente (techo). 26 especímenes, incluso un notable cráneo desenterrado en 1972, y designado KNM-ER 1470, proceden de sedimentos subyacentes a la toba KBS. (La designación es una abreviatura del número formal de registro en el museo: Kenya National Museum-East Rudolf Nº 1470. Otros 34 ejemplares, entre los cuales varios cráneos, provienen de sedimentos situados sobre la toba KBS, pero bajo la toba Okote. Desafortunadamente para los interesados en medir las velocidades de cambio evolutivo en los linajes de homínidos, la diferencia entre las fechas más antigua y más reciente propuestas para la toba KBS es de alrededor de 1.300.000 años.

Ese intervalo cronológico sobrepasa el que se asignaba al total de la evolución humana hace no muchos años. Incluso según los cánones actuales, la discrepancia acerca de la toba KBS es suficiente para dar cabida a ritmos de evolución incómodamente diferentes para diversos linajes hipotéticos de homínidos. Hasta la fecha, el debate no ha podido ser resuelto mediante pruebas de otra especie. Por ejemplo, nuestros colegas John Harris, del Instituto Louis Leakey, y Timothy White, de la Universidad de California en Berkeley, que han llevado a cabo un estudio detallado de la evolución de los suidos (jabalíes) por toda Africa, sugieren que la fecha más reciente para la toba KBS se adaptaría mejor a los datos fósiles con que ellos cuentan. Por otra parte, los estudios de las huellas de fisión en zirconios de la toba KBS indican que las fechas más antiguas son correctas. De momento hemos de aceptar el hecho de que la edad de la toba KBS o bien es de unos 2,5 millones de años, o bien fluctúa entre 1,8 y 1,6 millones de años.

Haciendo caso omiso de las cronologías relativa y absoluta, otras direcciones de investigación están ampliando nuestros conocimientos acerca de los diferentes ambientes en que habitaron los homínidos de Turkana Oriental. Por ejemplo, la mayoría de los ejemplares de homínido pueden situarse, en general, ya sea en el género *Australopithecus* o en el género *Homo*. Behrensmeyer, Findlater y Bowen están dedicados a estudios de microestratigrafía que han permitido al primero relacionar a muchos de los especímenes con determinado entorno de entierro sedimentario. Los análisis preliminares indican que los especímenes identificados como pertenecientes al género *Homo* se fosilizaron con mayor frecuencia en sedimentos de ribera lacustre que en sedimentos fluviales, mientras que los identificados como de *Australopithecus* se encuentran por igual

en ambos entornos sedimentarios. Hechos como éstos prometen ser de gran utilidad para reconstruir la vida de los primeros homínidos. En este caso, las probabilidades de que un organismo quede enterrado cerca del lugar en donde pasa la mayor parte de su tiempo es mayor que la de que aparezca sepultado más lejos. Por esto Behrensmeyer ha planteado la hipótesis de que en esta región de Africa, al parecer, el antiguo *Homo* prefería vivir en la ribera lacustre.

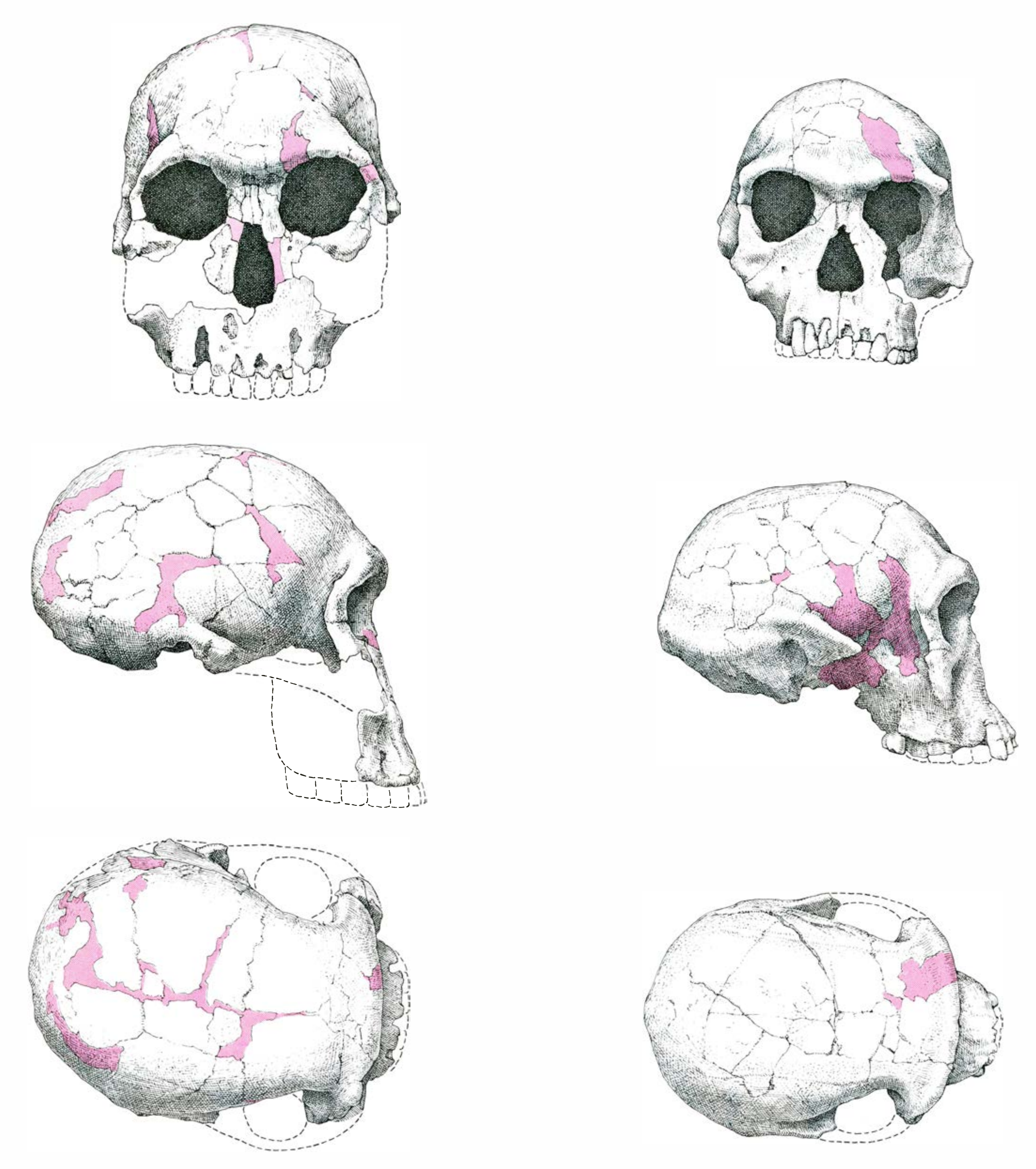
A causa de las insólitas circunstancias registradas en esta región de complicada geomorfología, resultará útil describir la manera en que se han recogido los fósiles de homínidos. El proceso inicial es la prospección superficial. El grupo de prospección, compuesto por nacionales de Kenia, está dirigido por Bwana Kimeu Kimeu; su labor consiste en localizar zonas



HOMINIDOS FOSILES de los primeros hallados en Turkana Oriental. A la izquierda está el registrado en el Museo Nacional de Kenia con el número de entrada 406 (KNM-ER 406), un cráneo robusto, con huesos faciales bien conservados. A la derecha se ilustra el KNM-ER 732, cráneo fragmentado, de cuyo rostro ha quedado muy poco, y menos robusto que el KNM-ER 406. A ambos especímenes se les suele encuadrar dentro del género *Australopithecus*.

en las cuales la erosión natural haya dejado desperdigados y al descubierto huesos y dientes de mamíferos sobre la árida superficie de las capas sedimentarias. Kimeu es habilísimo para reconocer hasta pedazos fragmentarios de hueso de homínido en el desecho óseo general.

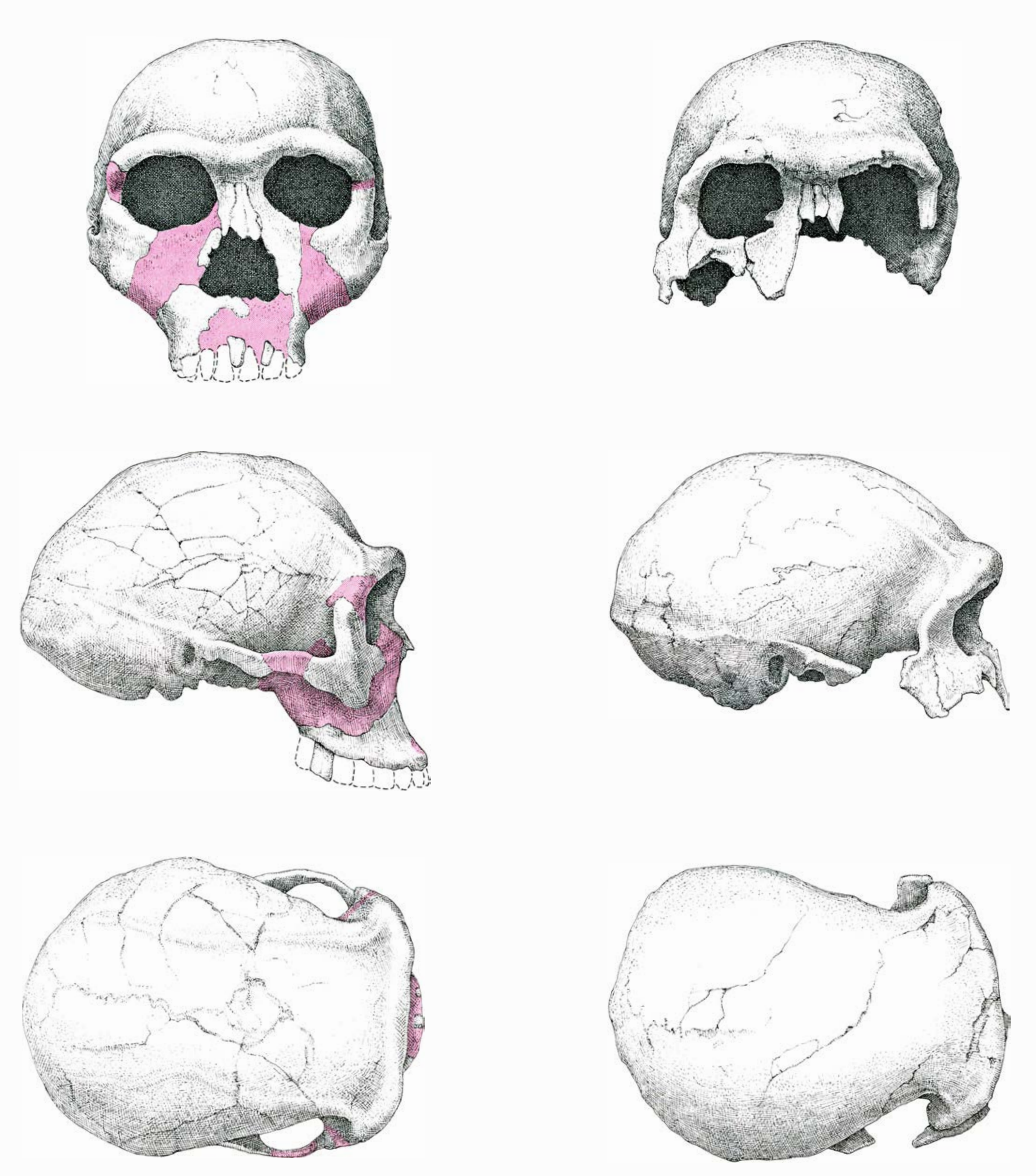
Una vez estos exploradores han establecido la presencia de un homínido fósil, uno de los geólogos del proyecto determina su posición con respecto a la sección estratigráfica local, y registra su emplazamiento. A continuación suele seguirse uno de dos procedimientos. Si el fragmento de hueso está limpio y totalmente desprendido de la ganga de sedimentos en que yacía se cava y tamiza luego toda el área superficial circundante, con la esperanza de recuperar otros fragmentos. Conforme se efectúa el raspado, se pone gran atención en la búsqueda de fragmentos que



KNM-ER 1470, izquierda y KNM-ER 1813, derecha, son homínidos fósiles de edades diferentes. El primero proviene del miembro inferior de la Formación Koobi Fora; su antigüedad no puede ser de menos de 1,6 millones de años, y quizá sea de más de 2,5 millones. Su capacidad craneana es de unos 775 centímetros cúbicos, mientras que la media en los *Australopithecus* es de unos 500 centímetros cúbicos. El segundo cráneo está provisionalmente asignado al miembro superior de la Formación Koobi Fora, con lo que se sugiere que su edad es al menos de 1,2 millones de años y no más de 1,6 millones. Su capacidad craneana es de unos 500 centímetros cúbicos. Se asemeja a otros homínidos fósiles africanos de hace entre dos y millón y medio de años.

pudiesen permanecer todavía *in situ*, es decir, englobados parcial o totalmente en la roca. Si el hallazgo inicial es un fragmento fósil *in situ*, el procedimiento seguido es otro. Se comienza la excavación en una escala casi microscópica, empleando como herramientas útiles de dentista y pinceles. Los fósiles de homínido de Turkana suelen estar tan poco mineralizados que es preciso untar el hueso con un producto endurecedor conforme avanza la excavación, para así evitar que se fragmente todavía más. Más aún, el líquido preservador debe colocarse con infinito cuidado, porque el impacto de una gota al caer puede desprender una esquirla.

Después de la excavación, cada yacimiento es señalizado con un poste de hormigón inscrito con un número de orden de entrada dado por el Museo Nacional de



DOS CRANEOS del género *Homo*, de las capas fósiles de Turkana Oriental. Representan a la primitiva especie humana *Homo erectus*, homínido fósil descubierto por vez primera en Java y China. Se trata de KNM-ER 3733 y KNM-ER 3883. Ambos datan de más de 1,5 millones de años atrás, un millón más que los especímenes hallados en China. Su gran antigüedad sugiere convincentemente que el *H. erectus* evolucionó primero en Africa. KNM-ER 3733 posee una capacidad craneana de unos 850 centímetros cúbicos; por lo que respecta a la capacidad craneana de KNM-ER 3883, ésta no se ha medido aún, pero probablemente es más o menos igual. La capacidad craneana de ciertos ejemplares de *H. erectus* procedentes de Java y de China es de más de 1000 c.c.

Kenia. La tarea siguiente, que suele realizarse en el laboratorio del proyecto en Nairobi, es reunir las piezas de los especímenes, lo que viene a ser como resolver un rompecabezas tridimensional al que le faltan muchas piezas, y cuya caja no muestra la figura terminada. Todo resto de matriz adherida se quita entonces bajo el microscopio, por lo general con ayuda de un diminuto martillo neumático. (La limpieza con ácido, método común de laboratorio, está descartada, porque el hueso fósil es menos resistente al ácido que la matriz misma.) Finalmente, las piezas de hueso endurecido se reconstruyen en la medida de lo posible, pegando uno con otro los fragmentos adyacentes.

¿Se puede considerar a la colección de Turkana Oriental como representativa de las poblaciones homínidas que ocuparon esa zona hace más de un millón de años? La tafonomía, disciplina relativamente nueva que intenta definir los procesos por los cuales unas comunidades de plantas y animales se conservan o no como fósiles, está empezando a dar ciertas respuestas útiles a esa pregunta. Las desviaciones o sesgos que afectan a las muestras fósiles son muchas. Por ejemplo, hay circunstancias que pueden traer por consecuencia la preservación de sólo ciertas partes de ciertos individuos. O bien determinado espécimen puede estar muy deformado por la presión sufrida durante su prolongado entierro. Un sesgo fácil de reconocer en la colección de Turkana Oriental es el desproporcionado número de mandíbulas inferiores del homínido primitivo, *Australopithecus robustus*. Este tenía mandíbulas y maxilares potentes y muelas enormes; su mandíbula inferior era especialmente maciza. La relativa abundancia de esas mandíbulas y dientes en los sedimentos de Turkana Oriental probablemente se deba más a su resistencia mecánica y, por tanto, a su mayor capacidad para sobrevivir a la fosilización, que a una preponderancia de miembros de la especie *A. robustus* en la población.

Otro ejemplo de sesgo en la colección de fósiles de homínido es la representación desproporcionada de diferentes partes del esqueleto. Los dientes son, con mucho, las piezas más duras, por lo que no debe sorprender que compongan la mayor proporción de piezas en la muestra de Turkana Oriental. En cambio, rara vez se encuentra vértebras o huesos del pie o de la mano. ¿Es lícito atribuir esta parcialidad tan sólo a los procesos destructivos correspondientes al enterramiento y a la exposición a la intemperie? Parece lógico tener en cuenta un tercer proceso: carnívoros y carroñeros que se alimentasen de los cuerpos de homínido antes de que los cubriesen los sedimentos.

¿Qué proporción de la población homínida existente en Turkana Oriental, hace más de un millón de años, podría representar nuestra colección de fósiles? La respuesta, basada en modernos estudios demográficos de cánidos y papiones, es que dicha proporción es pequeñísima. Suponiendo un adecuado intervalo entre generaciones, si la densidad de la población homínida era pequeña, como ocurre con los modernos chacales, la colección representa dos diezmilésimas de la población original. Si la densidad demográfica de los homínidos era elevada, como ocurre con los papiones, dicha proporción es muchísimo menor: dos diezmillonésimas. Si preguntamos además qué fracción de la antigua población está representada por los cráneos relativamente completos de la colección, aquélla puede ser aún menor: está entre una cienmilésima y una cienmillonésima del total. La segunda cifra es el equivalente a elegir al azar dos indivi-

ILERET

	EDAD (MILLONES DE AÑOS)	COMPLEJO TOBACEO	1/1A	3	5	6/6A	7A	8	10	11	12	15
FORMACION GUOMDE					● 3884	× 999						
FORMACION KOOBI FORA, MIEMBRO SUPERIOR	1.22 – 1.32	CHARI										
			● 725 × 739 ● 728 × 741 ● 805 × 993 ● 3883	● 992 ● 1467 × 740		● 731 ● 1466	● 404			● 726 × 1465		
	1.48 – 1.57	MEDIO/ INFERIOR	× 1463			● 818 ● 2593		● 729 ● 807 ● 733 ● 808 × 803 ● 806 ● 809		● 1468		
			● 819 ● 820 ● 1817 ● 2595	● 1819		● 727 ● 2592 ● 801 ● 3737 ● 802 × 1464 ● 1170 × 1823 ● 1171 × 1824 ● 1816 × 1825 ● 1818			● 406 ● 407 ● 732 × 815		× 1591 × 1592	
	2.42 (FITCH, MILLER) 1.6 – 1.8 (CURTIS)	EQUIVALENTE AL KBS									● 1593	● 2597 ● 2599 ● 2598 × 2596
FORMACION KOOBI FORA, MIEMBRO INFERIOR											● 1590	

INVENTARIO DE HOMINIDOS FOSILES hallados en Turkana Oriental, identificados por su respectivo número de catálogo, y anotados según la zona numerada en donde fueron hallados. Sus posiciones no indican ninguna posición cronológica relativa, excepto una ubicación entre las capas de toba señalizadoras datadas (u otros señalizadores equivalentes). Dicha posición significa que el espécimen es más antiguo que la edad conocida de la capa de toba

duos para representar toda la población actual de los Estados Unidos. Nuestras hipótesis acerca de la evolución de los homínidos han de basarse en esta exigua muestra.

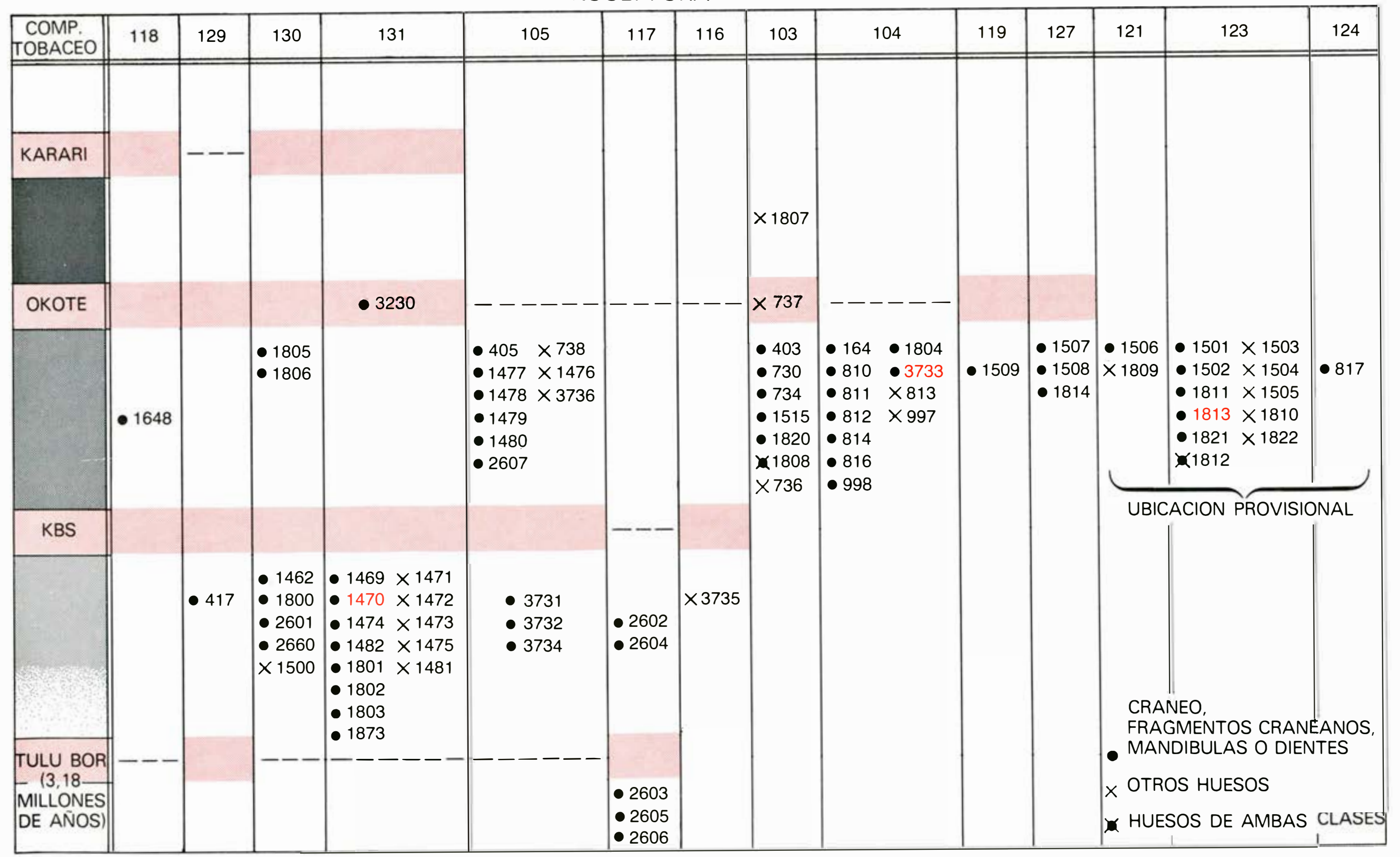
Al elaborar tales hipótesis debemos tener presentes numerosos y fundamentales interrogantes. Uno de ellos es: ¿Cuántas especies diferentes de homínidos primitivos hubo en Turkana Oriental? Otro es si esas especies, sea cual haya sido su número, existieron por largo tiempo o fueron reemplazadas por otras. Asimismo, ¿muestra alguna de ellas signos de evolución durante este intervalo de quizás 1,5 millones de años o quizá de sólo 700.000 años? Si hubo un cambio evolutivo, ¿qué índole tuvo? ¿Cómo se alimentaban los homínidos primitivos? ¿Fueron herbívoros de energía relativamente baja, u omnívoros de elevada energía? Si en verdad hubo varias especies presentes en un mismo tiempo, ¿ocupó cada una un nicho ecológico especial? ¿Qué mantenía separados esos nichos?

Los interrogantes no son solamente ésos. Otros, más estrictamente anatómicos, también exigen respuestas. ¿Poseen los homínidos fósiles algún atributo morfológico que pudiera correlacionarse con el registro arqueológico de empleo de utensilios y comportamiento de carroñero cazador en la zona? Por ejemplo, ¿puede detectarse alguna prueba de evolución cerebral significativa durante el período en cuestión? ¿Hay algún cambio morfológico que sugiera alteración en los patrones de locomoción o de uso de la mano, que pudiera dar algunas luces sobre ciertos atributos singulares del hombre? (A efectos de la presente exposición definimos como incluidos en esos atributos no sólo el caminar erecto y el hacer uso de herramientas, sino también el aumento del cerebro y la capacidad de comunicarse mediante el lenguaje).

Estas y muchas otras preguntas sólo pueden responderse después de haber dado cuenta del primer interrogante de la serie. De naturaleza básicamente taxonómica, pregunta cuántas especies están representadas en la colección de homínidos fósiles de Turkana Oriental. Ya hemos dicho que, en general, había presentes dos géneros: *Australopithecus* y *Homo*. ¿Cómo podrían subdividirse ambos?

La respuesta a esta cuestión, básica y nada sencilla, dista mucho de ser fácil. Contra una contestación lisa y llana conspiran factores tales como la pequeñez de la muestra, el estado fragmentario de los diversos ejemplares el hecho de que incluso entre unos y otros individuos de la misma especie hay un extenso grado de variabilidad morfológica que está muy lejos de ser raro, y dentro de ese mismo aspecto, el hecho de que a menudo se halla una gran variación entre los dos sexos de una misma especie. Tampoco es de descuidar la falibilidad del analista, proclive a los prejuicios humanos. Por ejemplo, el orden mismo de descubrimiento de los homínidos de Turkana Oriental ha afectado nuestras hipótesis, y hemos tenido que tajar y cambiar a fin de mantenernos a la par de descubrimientos subsiguientes.

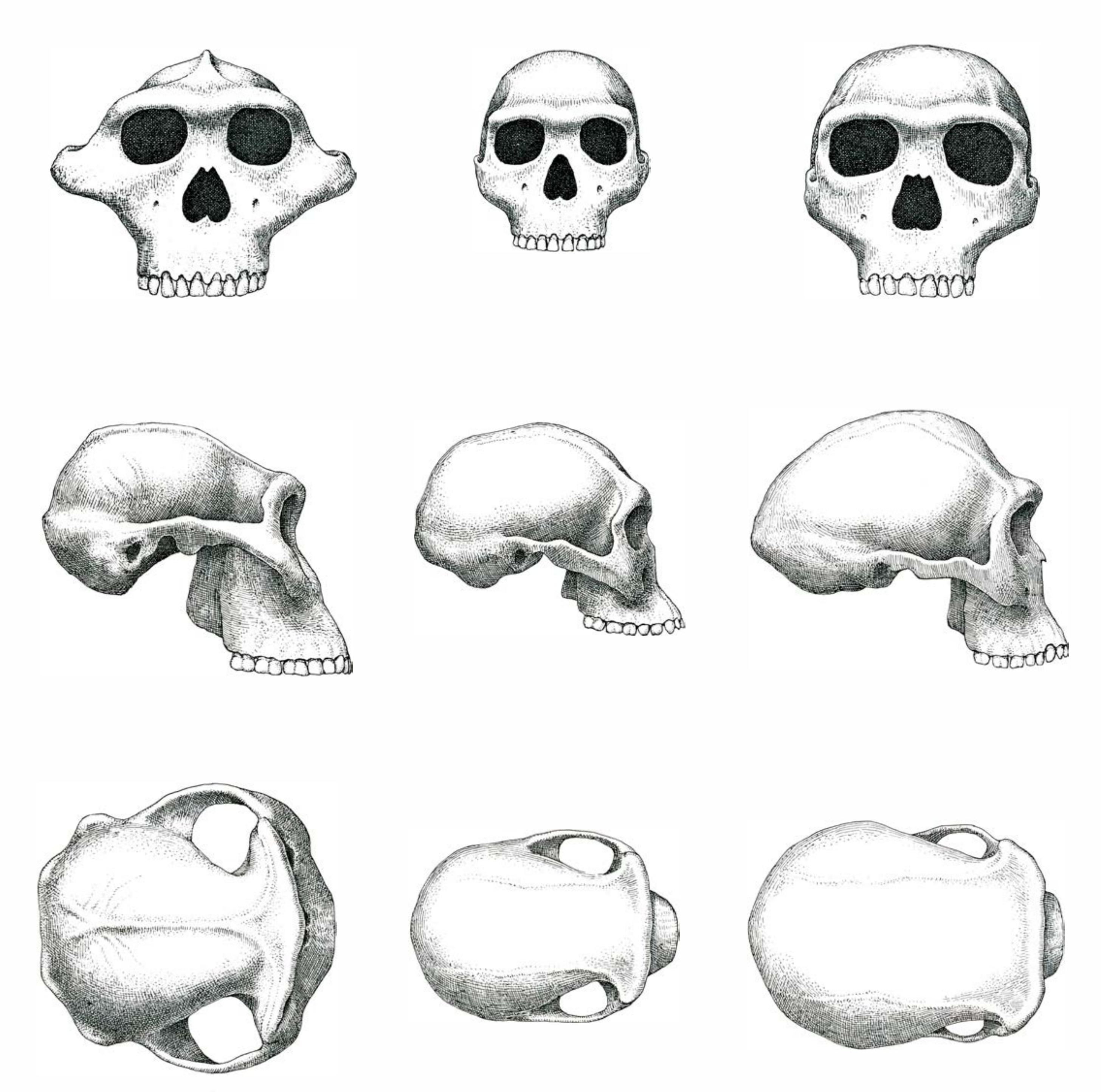
En este aspecto es esclarecedor echar un vistazo a la secuencia de descubrimientos de homínidos en Turkana Oriental. Los primeros ejemplares que se identificaron fueron individuos de la especie *Australopithecus robustus*. Representantes fósiles de esta especie se hallaron por primera vez hace algunos decenios en Africa del Sur. Son típicamente de cara ancha y mandíbula masiva: los premolares y molares (muelas de muda y propiamente dicha) son muy grandes, aunque los incisivos y caninos son pequeños, de tamaño



suprayacente, y más reciente que la edad conocida de la toba subyacente. Los números de color identifican a los fósiles ilustrados en las páginas anteriores. Dos columnas geológicas definen los estratos sedimentarios; obsérvese las edades de las capas de toba señalizadoras. Las rayas discontinuas muestran la correlación existente entre tobas de Koobi Fora y de Ileret. La situación de los ejemplares de las últimas columnas es provisional, por falta de niveles-guía.

más o menos igual al de los dientes frontales del hombre moderno. Aunque el cráneo es grande, la capacidad craneana media es de unos 500 centímetros cúbicos, frente al promedio humano de 1360 centímetros cúbicos. A causa de que los músculos masticadores tenían evidentemente un tamaño proporcionado a los grandes molares y voluminosas mandíbulas, muchos ejemplares de *A. robustus* poseen no sólo molares extraordinariamente sobresalientes sino también una cresta ósea a lo largo de la caja craneana creándose así una mayor extensión para la inserción de los músculos masticadores.

También se han hallado especímenes de *A. robustus* en Africa Oriental, muy destacadamente los encontrados por Louis y Mary Leakey en la Quebrada Olduvai. Los ejemplares africanos orientales son en conjunto mayores que los de Africa del Sur, y sus muelas más masivas. Un conocido ejemplo es el "Zinjanthropus", un cráneo de Olduvai aceptado hoy por la mayoría de los eruditos como estrechamente emparentado con los especímenes de *A. robustus* de Africa del Sur. (Debe observarse que algunos estudiosos continúan asignando el "Zinjanthropus" a una especie emparentada de *Australopithecus*, el *A. boisei*). Dejando de lado esas pequeñeces taxonómicas, el hecho es que se ha visto que los depósitos de Turkana Oriental contienen un buen número de fósiles que pueden adscribirse a esta especie de homínido.



TRES FORMAS DE HOMINIDO figuran entre los fósiles hallados en el miembro superior de la Formación Koobi Fora. La ilustración los muestra cómo se verían restaurados, omitiéndose las mandíbulas inferiores. Los tres pueden ser asignados a determinadas especies de cinco diferentes maneras: o bien pertenecen todos a una sola especie muy variable, o pueden pertenecer a dos especies según tres combinaciones posibles, o quizá cada forma constituya una especie válida por sí misma. Los autores sugieren que, la hipótesis más probable es la de las tres especies, a saber: las tres formas representan tres especies distintas.

En las primeras investigaciones realizadas en Turkana Oriental se descubrió asimismo cráneos de ciertos homínidos más pequeños y menos robustos. De hecho, uno de esos cráneos, deformado por aplastamiento, apareció cerca del KNM-ER 406, cráneo de un robusto *Australopithecus* (aunque no estaba en el mismo horizonte estratigráfico). Recién descubierto este espécimen aplastado, no pudo asignársele fácilmente una posición taxonómica. Pero el hallazgo de otro ejemplar delicado (no robusto), nos sugirió que quizás un dimorfismo entre macho y hembra explicase ambos tipos de cráneo. En el segundo ejemplar subsistían la mayor parte de la pared derecha de la caja craneana y del cráneo facial, parte de un premolar superior y las raíces de los molares. Es evidente que si bien este individuo era bastante menos robusto que el KNM-ER 406, sus molares y premolares eran sólo un poco menos macizos que los de éste. Si entre las especies de *A. robustus* las diferencias entre machos y hembras eran tan grandes como lo son entre los gorilas, entonces los especímenes robustos y provistos de cresta ósea de Turkana Oriental podrían haber sido machos y los ejemplares más delicados podrían haber sido hembras.

La antigüedad de estos especímenes de *Australopithecus* es considerablemente mayor que la de cualquier otro descubierto en el sur de Africa (cuya edad, por lo demás, sigue siendo dudosa), pero su hallazgo no planteó problemas taxonómicos. Lo que terminó con esta dichosa simplicidad fue el descubrimiento, en 1972, del cráneo KNM-ER 1470. Bwana Bernard Ngeneo se topó con él en un afloramiento de sedimentos más antiguos, pertenecientes al miembro inferior de la Formación Koobi Fora. Cuando halló el ejemplar, todo lo que podía verse era un desparramo de fragmentos de hueso en la superficie rocosa. Los fragmentos eran relativamente frágiles, lo que nos llevó a suponer que se habían desprendido de la matriz hacia relativamente poco tiempo.

El espécimen KNM-ER 1470 es un cráneo grande, de construcción delicada, gran parte de cuyo esqueleto facial ha sobrevivido. Nuestro colega Ralph Holloway, Jr., de la Columbia University, ha medido su capacidad craneana en unos 775 c.c. El esqueleto facial es muy grande y las proporciones de los dientes anteriores y yugales quedan indicadas por los alvéolos dentales conservados y por los alvéolos y raíces quebradas de los molares. Las proporciones son opuestas a las del *A. robustus*; los incisivos y caninos eran grandísimos y los premolares y molares tenían un tamaño sólo moderadamente grande. Aunque el tamaño de los dientes sugiere un aparato masticador impresionante, la bóveda craneana no muestra señales de una cresta para la fijación de poderosos músculos masticadores. De modo análogo, los molares, si bien incompletos, no sugieren la misma anchura facial tan pronunciada, característica del *A. robustus*.

Mucho se ha escrito acerca del significado del KNM-ER 1470. Nosotros creemos que ciertos ejemplares de homínidos hallados en la Quebrada de Olduvai, rotos y en estado fragmentario, son ejemplos de la misma clase de cráneo. Si es preciso decidir acerca de una designación taxonómica para estos homínidos, es muy posible que la especie resulte ser la *habilis* (*Homo habilis* es el nombre que Louis Leakey y sus colegas John Napier, de la Universidad de Londres, y Phillip V. Tobias, de la Universidad del Witwatersrand, dieron a una primitiva especie del género *Homo*. El nombre no tuvo aceptación unánime entre otros estudiosos del hombre fósil e incluso ha provocado acaloradas discusiones).

Nosotros mismos no hemos podido ponernos de acuerdo en la asignación de un género para el KNM-ER 1470. Leakey prefiere situar la especie en el género *Homo*, mientras que Walker la encuadra en el de *Australopithecus*. La discrepancia es tan sólo de nomenclatura; estamos firmemente de acuerdo sobre la significación evolutiva de lo que ahora son hallazgos múltiples. Desde 1972 hasta ahora se han hallado otros dos cráneos incompletos de esta clase, de gran capacidad cerebral y elevada bóveda, asociados con estratos asignados al miembro inferior de la Formación Koobi Fora.

Más o menos en la época en que se descubrió el KNM-ER 1470 fue cuando nuestros colegas y nosotros empezamos a estar en desacuerdo en cuanto a la posición taxonómica de ciertas mandíbulas inferiores bien conservadas, de la región de Turkana Oriental. El motivo inicial de desacuerdo fue un cráneo pequeño: KNM-ER 1813. Se trata del cráneo de un homínido de cerebro pequeño, cuya capacidad craneana es la media del *Australopithecus*: 500 c.c. Tiene un esqueleto facial y el paladar relativamente grandes. Sin embargo, los dientes superiores, preservados con el paladar son comparativamente pequeños, y guardan un sorprendente parecido con los dientes de uno de los ejemplares de *Homo habilis* de Olduvai, el OH-13. Ocurre que en la controversia inicial acerca de los especímenes originales de *H. habilis*, OH-13 representaba una especie acerca de la cual hasta los escépticos concordaban en que era casi, o bien del todo, idéntica a la especie *Homo erectus*, miembro prestigiado del género *Homo*, reconocido por primera vez en Java y el norte de China.

Las semejanzas entre KNM-ER 1813 y OH-13 van más allá de sus dientes. En todas las partes que pueden compararse –tanto el paladar como los dientes, buena parte del basicráneo y casi todo el occipucio– ambos especímenes resultan ser prácticamente idénticos. Esto nos lleva a creer que las reconstrucciones habituales del OH-13, en las que se ha supuesto que el ejemplar poseía una gran capacidad craneana y un cráneo semejante al del *H. erectus*, son erróneas. Y eso no es todo. La mandíbula del OH-13 fue preservada; su pequeñez y los detalles de los dientes fueron componentes principales de las pruebas que inducían a la conclusión de que el *H. habilis* era cercano al linaje del *H. erectus*. Las mandíbulas inferiores comparables que hemos encontrado en Turkana Oriental, según podemos ver ahora, dejan en claro que la mandíbula del OH-13 bien podría haber estado articulada a un cráneo de escasa capacidad y de bóveda delgada, como el de KNM-ER 1813.

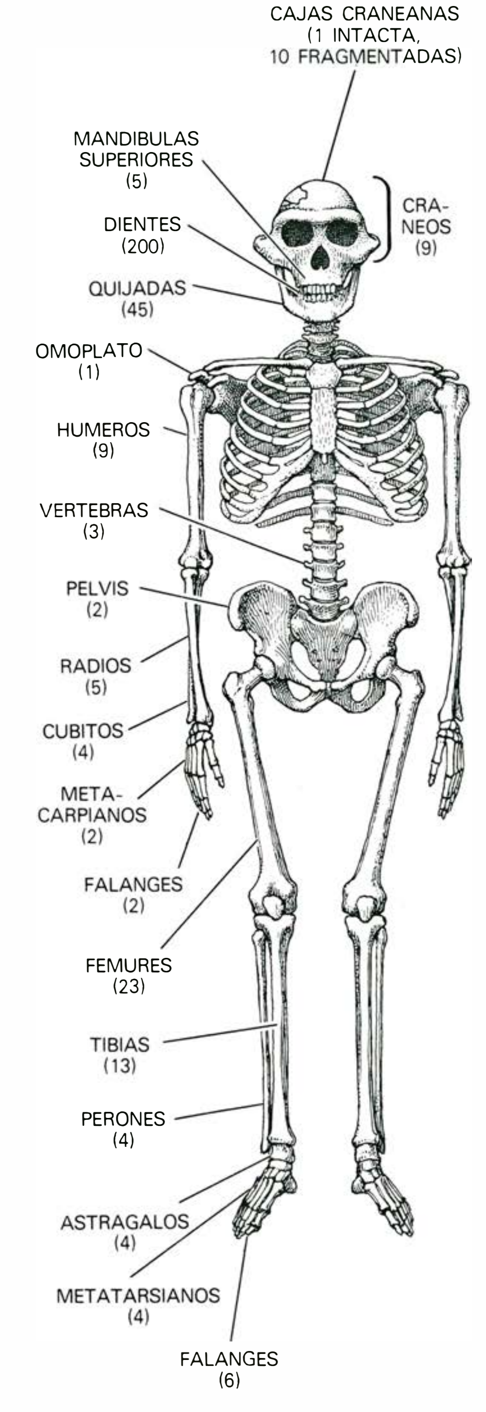
Para mencionar un último aspecto concerniente a estos enigmáticos especímenes de Turkana Oriental, creemos que hay grandes semejanzas entre ellos y algunos de los especímenes, más pequeños, de *Australopithecus* procedentes de yacimientos sudafricanos, a los que suele situarse en la delicada especie de *A. africanus*. Enfrentados a tantas posibilidades, propugnamos tener cautela al formular juicios taxonómicos. Esa cautela debiera prevalecer no solamente cuando las pruebas disponibles son unos cuantos dientes aislados, sino también cuando las hay en mayor abundancia: mandíbulas inferiores y mandíbulas superiores con los dientes todavía en su lugar.

En la campaña de 1975 descubrimos completo un notable cráneo: el KNM-ER 3733. El hallazgo demostró de modo inequívoco que un individuo de nuestro propio género estaba presente en Turkana Oriental cuando se formaban los primeros estratos del miembro superior de la Formación Koobi Fora. El cráneo guarda un sorprendente parecido con algunos de los cráneos de *Homo erectus* hallados en el decenio de los años treinta cerca de Pekín, y perteneció ciertamente a un miembro de esa especie. La bóveda craneana es grande, baja y de huesos gruesos. Su parte principal la forma un occipital protuberante, y su capacidad craneana es de unos 850 c.c. Los arcos superciliares sobresalen por encima de las órbitas, y tras ellos se ve un nítido surco allí donde

el hueso frontal se eleva hacia el ápice de la bóveda.

El KNM-ER 3733 tiene un rostro pequeño, remetido bajo el toro superciliar. Conserva los alvéolos de algunos de los dientes superiores. Los incisivos que faltan eran relativamente grandes, pero las piezas dentarias yugales (algunas de las cuales siguen en su lugar) son de proporciones apenas modestas. Entre las que faltan están las muelas cordales, pero los indicios señalan que eran de tamaño bastante pequeño. Habían asomado con anterioridad suficiente como para haber desgastado surcos en los segundos molares que los precedían en orden de colocación, y sin embargo el hueso que forma los alvéolos indica que sus raíces eran muy pequeñas. Este detalle es importante porque una disminución en el tamaño de estos molares es un fenómeno común en las poblaciones humanas modernas.

Ese hermoso ejemplo de *Homo erectus* de Turkana Oriental antecede al ejemplo de la misma especie hallado en la Garganta de Olduvai en medio millón de años y es alrededor de un millón de años más antiguo que los ejemplos procedentes del norte de China. KNM-ER 3733 no está solo. Poco después se halló otro espécimen de *H. erectus* en el Area Nº3 de las capas fósiles de Ileret. Se trata del KNM-ER 3883, y procede de un horizonte geológico aproximadamente igual al del KNM-ER 3733. Su conformación craneana es bastante igual a la de éste, pero sus arcos superciliares, esqueleto facial y procesos mastoideos, son algo más recios. No se ha determinado aún la capacidad craneana del KNM-ER 3883, pero no hay motivos para prever que será muy diferente de la del KNM-ER 3733. La semejanza de los dos especímenes de Turkana Oriental con ejemplares de lugares lejanos y que son mucho más recientes sugiere convincentemente que *Homo erectus* fue una especie de hombre morfológicamente estable durante un período de al menos un millón de años.



DESPROPORCION en la conservación de los restos de homínidos fósiles desenterrados hasta ahora en las excavaciones realizadas en Turkana Oriental. Los restos más numerosos son dientes, las piezas más duras de todas las partes del cuerpo. Luego vienen las mandíbulas, de las cuales la mayoría representa la robusta especie de *Australopithecus*. Los más escasos de todos son los huesos de la cintura, los de manos y pies, las vértebras y los antebrazos.

Dejando de lado los problemas planteados por diversos especímenes fragmentarios, ¿cómo pueden valorarse taxonómicamente los nuevos hallazgos de homínidos de Turkana Oriental? Se podría sugerir sencillamente una serie de atribuciones taxonómicas normales en vista de lo que vemos de momento, reconociendo que, tal como en el pasado, dichas atribuciones o encasillamientos probablemente cambien. Pero aquí no lo haremos de ese modo, porque ahora abordamos el problema del encasillamiento taxonómico de una manera un poco diferente.

Teniendo en cuenta sólo los fósiles del miembro superior de la Formación Koobi Fora, creemos reconocer especímenes que pueden encasillarse en tres especies diferentes. Al mismo tiempo quizás hayamos incurrido en un grave malentendido en cuanto a la cantidad y calidad de las variaciones en cualquiera de las tres especies. En esta perspectiva, cabe considerar las posibilidades siguientes:

1. Las tres formas son tan sólo ficciones de nuestra imaginación. Hubo presente una sola especie de homínido, y lo que tomamos por tipos distintos no son sino variantes morfológicas dentro de dicha especie.

Esta es, claro está, la hipótesis de la especie única. Sus más fervientes proponentes han sido Loring C. Brace y Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan. Expresada escuetamente, la hipótesis afirma que desde que llegaron a establecerse los atributos humanos de marcha erguida, niñez prolongada, cerebro voluminoso y colmillos pequeños, ha habido sólo una especie de homínido. Lo que originó esto, afirman los partidarios de la hipótesis, fue la cultura. Una vez que la cultura llegó a ser el ámbito humano –y pruebas de esto pueden buscarse en los huesos fósiles al intentar ver los atributos básicos de la anatomía humana que se desarrollaron conjuntamente con la cultura– el nicho ecológico humano llegó a ser tan grande, que la especie dotada de cultura tuvo siempre la ventaja respecto de cualquier otra especie en la competencia por los recursos disponibles.

2. Dos de las tres formas representan una especie; la tercera representa una segunda especie. En esta hipótesis, la especie aparte es *Homo erectus*. Por tanto, las otras dos formas deben ser miembros de una sola especie, muy variable y sexualmente dimórfica. Los ejemplares muy robustos eran machos, y los muy delicados eran hembras.

Para aceptar esta versión de la hipótesis dimórfica es preciso postular una elevadísima variabilidad. La diferencia de capacidad craneana entre los especímenes robustos y los delicados está dentro de los límites observados en poblaciones vivientes de monos sexualmente dimórficos. Sin embargo, la diferencia en el tamaño de piezas dentales sobrepasa los límites observados entre los simios actuales.

3. Dos de las tres formas constituyen una especie, como en el caso anterior, sólo que las formas robustas constituyen una de las dos, y los especímenes de *Homo erectus* junto con las formas delicadas representan otra especie, sumamente variable.

En esta hipótesis de dimorfismo, la principal variación postulada reside en el tamaño y la forma de la caja craneana. El hecho de que la hipótesis pueda o no admitirse depende de la aceptación o rechazo del hecho de que entre los humanos primitivos, la capacidad craneana de las hembras fuese aproximadamente la mitad de la de los varones.

4. Dos de las tres formas constituyen una especie, como en el supuesto anterior, sólo que las formas delicadas representan una de ellas y la segunda especie, altamente variable, se compone de las formas robustas y de los especímenes de *Homo robustus*.

En esta hipótesis dimórfica la principal variación postulada implica a la caja craneana, las mandíbulas y los dientes. La admisibilidad de la hipótesis descansa en la aceptación del hecho de que sea posible incluir, en una misma especie, las formas de cerebro pequeño, pero de grandes mandíbulas, y las de gran cerebro, pero mandíbulas pequeñas.

5. Las tres formas representan tres especies distintas.

Habiendo reseñado las cinco hipótesis posibles, podemos valorar ahora las probabilidades de veracidad de cada cual. Lo haremos teniendo presente tanto las pruebas fósiles, como lo que se sabe acerca de la variabilidad de las poblaciones de primates vivientes. Creemos que las probabilidades de que la hipótesis de una sola especie sea correcta son muy pocas. Primero, supone aceptar el hecho de que haya una enorme cantidad de variabilidad dentro de la especie. Segundo, creemos, al igual que otros, que las adaptaciones notorias en los cráneos de ambas formas extremas (*Homo erectus* y *Australopithecus robustus*) son diferentes. En el *H. erectus* el tamaño de la caja craneana parece sobrepasar al del aparato masticador, tal como ocurre en el hombre contemporáneo. En el *A. robustus* ocurre lo contrario.

Por el mismo motivo creemos que son escasísimas las probabilidades de veracidad de la cuarta hipótesis. Además, se interponen otras dificultades, aparte las anatómicas. Es preciso preguntarse además por qué en Java y China, en donde los especímenes de *H. erectus* son relativamente abundantes, no se encuentran ejemplares de *H. robustus*. Si la respuesta es que dichos especímenes estuvieron presentes, pero que por determinado motivo no se fosilizaron o no han sido desenterrados todavía, ¿cómo puede ser que el *A. robustus* sea el homínido más común entre los fósiles hallados en Africa Oriental?

La tercera hipótesis es atrayente, pero pensamos que es poco probable que sea correcta. Sería ya bastante difícil justificar el enorme dimorfismo en el tamaño de los cerebros, sin tener que responder también a otra interrogante: ¿Por qué de estas delicadas formas de *Australopithecus* no se encuentran fósiles en Java y en China?

Nos parece que la segunda hipótesis tiene más posibilidades de ser correcta que la tercera. Aunque en poblaciones dimórficas vivientes es imposible hallar semejante variabilidad en las dimensiones y proporciones de las piezas dentales, hay ciertos indicios de que el dimorfismo dental quizás haya sido mayor entre los extintos hominoides: la superfamilia que abarca a homínidos y póngidos. Louis de Bonis, de la Universidad de París, ha reunido una serie de maxilares de hominoides miocénicos de Macedonia. Su muestra proviene de una zona restringida; si las mandíbulas pertenecen todas a la misma especie, representan un grado de dimorfismo dental mayor que el que se encuentra entre los actuales póngidos.

La hipótesis cuyas probabilidades de ser la correcta son mayores es, a nuestro parecer, la última de las cinco: que hay presentes tres especies. Ordenados de esta manera, ninguno de los especímenes de cada grupo exhibe una variabilidad, de tamaño cerebral o de aparato masticador, mayor que la observada entre los antropoides vivientes. Si bien el registro fósil del miembro inferior de la Formación Koobi Fora es menos rico que el de su miembro superior, respecto a los especímenes que se hallan en aquél, también podría plantearse una hipótesis parecida, de tres especies. En ella, la tercera especie, además de la delicada y de la robusta, estaría representada por especímenes de *H. habilis*.

De la valoración que hemos hecho de las hipótesis se deducen varias consecuencias. Por ejemplo, a nuestro parecer, la demostración habida en Turkana Oriental de que *Homo erectus* fue contemporáneo de algunos de los representantes más voluminosos de *Australopithecus robustus* equivale a reprobar la hipótesis de la especie única. Creemos que tanto *H. erectus* como *A. robustus* poseían características esencialmente humanas. Si así fuese, se deduce que ocupaban nichos ecológicos separados. Parecería que, o bien una de esas especies carecía de cultura y sin embargo desarrolló carateristicas humanas, o bien que es falso el argumento de que la ventaja constituida por la cultura daría al homínido cultivado el dominio dentro de un nicho ecológico muy amplio.

Preferimos la primera alternativa, y como candidato al papel de homínido sin cultura propondríamos al *Australopithecus*. La aceptación de esta alternativa exige que sigamos buscando las presiones de selección natural que hayan sido las responsables de producir los atributos humanos básicos.

¿De dónde vino el *Homo erectus*? Algunos han sugerido que la especie se originó en Asia y emigró a Africa. Eso nos parece una hipótesis innecesariamente complicada. Por de pronto, no tiene en cuenta al *H. habilis*. Peor aún, implica el que una población de estos homínidos de voluminoso cerebro, que presumiblemente fabricaron los utensilios de piedra hallados en los primeros estratos de Turkana Oriental, evolucionaron independientemente en Africa en el momento justo como para encajar en una relación de antecesor-descendiente con el *Homo erectus*, y luego se detuvieron bruscamente, sin desempeñar un papel ulterior en la evolución humana.

Nuestra opinión es que las poblaciones de *H. habilis* son los antecedentes directos del *Homo erectus*. Si resulta que la gama más antigua de fechas para los estratos en donde se halló al espécimen KNM-ER 1470 de *H. habilis* es la correcta, el período de transición entre *habilis* y *erectus* podría haber sido gradual, abarcando bastante más de un millón de años. Si las fechas más tardías son las correctas, entonces la transición debe haber sido realmente muy rápida.

En este artículo nos hemos ocupado sobre todo de presentar una visión general del registro de homínidos de Turkana Oriental, haciendo caso omiso de otros trabajos en curso que prometen dar respuesta a algunos de los interrogantes que hemos planteado. El Proyecto de Investigación de Koobi Fora continúa sus actividades en el terreno y además hay en marcha numerosos estudios especiales fuera de Africa. Michael H. Day, de la Facultad de Medicina del St. Thoma's Hospital de Londres, está examinando los huesos de las extremidades de los fósiles de Turkana Oriental y las partes asociadas con ellos, para ver qué puede saberse acerca de la capacidad de las diversas especies para la marcha erguida. Bernard A. Wood, de la Facultad de Medicina del Middlesex Hospital de Londres, está llevando a cabo un análisis completo de los cráneos y mandíbulas a fin de documentar los extremos y las medias de variabilidad y dimorfismo. Holloway está estudiando moldes del interior de las cajas craneanas en un empeño por seguir la pista a la evolución del encéfalo.

Uno de nosotros (Leakey) continúa como codirector del proyecto de investigación, y el otro (Walker) está estudiando la biomecánica de la masticación homínida, examinando los dientes fósiles de Turkana Oriental con el microscopio electrónico de barrido, intentando deducir hábitos dietéticos a partir de las pautas de desgaste dental. Estos y otros estudios están encaminados a reconstruir lo que se pueda acerca de la biología de estos homínidos tan primitivos, con la esperanza de determinar qué fue, exactamente, lo que nos hizo humanos.

Ciencia y sociedad

Más aplicaciones del carbono 14

La datación por carbono 14, de fructífera aplicación en arqueología y en otras disciplinas, ha tenido siempre dos limitaciones. Primero, las muestras a datar han de ser relativamente grandes (entre uno y 10 gramos), lo que excluye la datación de muestras más pequeñas o de objetos preciosos que quedarían destruidos si se tomase una muestra de ellos. Segundo, las muestras con más de 40.000 años de antigüedad son poco menos que imposibles de datar, porque casi todo el carbono 14 que contenían se ha desintegrado ya radiactivamente. Sin embargo, en la actualidad los físicos están estudiando un nuevo método de datación por carbono 14 que se cree superará estas limitaciones y que podrá aplicarse a la determinación de la edad mediante otros isótopos radiactivos.

El nuevo método de datación se basa en el empleo de un acelerador de partículas como espectrómetro de masas supersensible. En el método original, desarrollado por Willard F. Libby y sus colaboradores en los años 40, la muestra a datar se quema primeramente para que desprenda dióxido de carbono, el cual se convierte en carbono puro al pasar sobre magnesio caliente. Luego se extiende el carbono formando una capa delgada en el interior de un contador proporcional, que mide su contenido de carbono 14. Este isótopo radiactivo se desintegra con una vida media de 5730 ± 40 años; si la proporción de su concentración frente a la concentración de carbono no radiactivo es alta, la muestra es joven, y si esta proporción es baja, la muestra es vieja.

En el método del acelerador de partículas se ioniza una muestra mucho más pequeña de carbono y los iones son acelerados formando un haz. Cada uno de los tres tipos de iones presentes en la muestra (el carbono 12, el nada frecuente carbono 13, ambos no radiactivos, y el carbono 14 que sí es radiactivo) tiene la misma carga eléctrica, pero diferentes masas. Ajustando el acelerador de manera que acelere primero un tipo de iones y luego el otro, pueden contarse los distintos iones de la muestra, logrando así determinar su abundancia relativa con gran precisión.

Ya en 1939 se empleó con este fin un acelerador, cuando Luis W. Alvarez y Robert Cornog, de la Universidad de California, en Berkeley, se hallaban investigando las diferencias entre los núcleos de helio 3 y los de hidrógeno 3 (tritio). Richard A. Muller, del Lawrence Berkeley Laboratory de la Universidad de California, volvió a emplear este método en 1976 en un experimento consistente en datar una muestra de deuterio (hidrógeno 2), determinando la concentración de deuterio frente a la de tritio en la muestra. Más tarde Muller y sus colaboradores aplicaron este método a la datación por carbono 14. Para los experimentos empleó como acelerador un ciclotrón. En la Universidad de Rochester y en la Universidad McMaster existen otros grupos que realizan experimentos similares trabajando con un acelerador Van de Graaff en tándem.

Los investigadores que operan de acuerdo con el método del acelerador han descubierto que sólo se necesitan miligramos de material para conseguir fecharlo. La sensibilidad del método incluso podría permitir la detección de cantidades sumamente pequeñas de carbono 14 en una muestra, después de que haya transcurrido un período de tiempo del orden de muchas veces la vida media del carbono 14. Muller llega a pronosticar que, a la larga, será posible determinar edades que se remonten hasta los 100.000 años.

Los primeros intentos de datación por carbono 14 con aceleradores han dado resultados prometedores. El grupo universitario de Rochester ha datado muestras con edades que van desde los 200 hasta los 48.000 años, logrando gran dancia con las edades de las mismas muestras calculadas por el método antiguo. Recientemente, el grupo de Berkeley acaba de conseguir por primera vez una "datación a ciegas" con un acelerador: fechar una muestra de dióxido de carbono cuya edad no conocían. Determinaron que su edad era 6060 ± 800 años, resultado que difiere de la edad determinada por el método antiguo en 830 años, o sea, una vez la desviación típica.

Ante los éxitos obtenidos en el carbono 14, Muller y otros creen que el método de datación empleando aceleradores podrá ser incluso más útil si se analizan otros isótopos. El grupo de Berkeley y otro de Grenoble (Francia) han trabajado en la datación con el isótopo radiactivo berilio 10, del que Muller dice que "es en potencia el carbono 14 de la geología". El berilio 10 queda atrapado en las rocas sedimentarias cuando éstas se forman, y debido a que tiene una vida media de 1,5 millones de años, siendo en consecuencia baja su radiactividad, es casi imposible detectarlos contando las desintegraciones. En el campo de la datación se está investigando con otros isótopos radiactivos, tales como el tritio, el aluminio 26, el silicio 32 y el cloro 36.

Esse est percipi

Característica singular de la mecánica cuántica es que esta teoría no se limita a la descripción de los sistemas físicos, como el movimiento de una partícula elemental, sino que especifica también aquello que el observador puede conocer sobre este movimiento. Una reciente serie de experimentos nos lleva a un resultado todavía más sorprendente surgido de esta teoría: la posibilidad de que el estado de la partícula pueda verse influido por el conocimiento o desconocimiento que de él tenga el observador. Los resultados experimentales parecen poner en duda la creencia filosófica de que el mundo existe y tiene propiedades fijas independientemente de cualquier observador. A fin de reconciliar los resultados experimentales con el sentido común, puede ser necesario postular simplemente que un sistema mecánico cuántico no tiene un estado definido hasta que dicho estado ha sido determinado de forma experimental.

Los experimentos en cuestión son variantes del propuesto en 1935 por Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen, reformulado en 1952 por David Bohm. Se reúnen dos protones en una configuración llamada singlete, y se les permite luego separarse. Una característica distintiva del estado singlete es la orientación que debe tener el momento angular de spin intrínseco de cada protón; los spines tienen que apuntar hacia direcciones opuestas. Si el spin de uno de los protones está orientado "hacia arriba", necesariamente el otro debe dirigirse "hacia abajo". Hay que destacar, sin embargo, que la descripción mecánico cuántica del estado singlete no dice nada acerca del spin real de cada una de las partículas.

En el experimento se han de alinear tres grupos de aparatos a lo largo de la trayectoria de cada protón. Encontramos, en primer lugar, un telescopio, que sólo indica el paso de protones y emite una señal si por los dos caminos se ha detectado una pareja conveniente. A continuación hay un "filtro de spin", que permite el paso únicamente a los protones con una orientación específica; por ejemplo, puede imaginarse como un dispositivo que bloquee todos los protones excepto aquellos que tienen su spin apuntando hacia arriba.

Cada camino termina en un detector que registra una cuenta cada vez que llega a él un protón que ha pasado por el mencionado filtro de spin.

Supongamos que en cada uno de los telescopios se ha detectado el paso de un protón y que estas dos partículas están en camino hacia sus respectivos filtros de spin y detectores. Dentro del contexto de la mecánica cuántica, es imposible, ni siquiera en principio, predecir el spin de cada protón; es necesario considerar que cada uno tiene la misma probabilidad de estar orientado hacia arriba que de estarlo hacia abajo. En un montaje de este experimento, los dos filtros de spin guardan la misma orientación (por ejemplo, hacia arriba), pero uno de los conjuntos de filtro y detector está mucho más cerca del origen que el otro. Cuando un protón incide sobre el primer conjunto de filtro y detector queda conocido su spin: si produce un registro en el detector, es señal indicativa de que ha pasado por el filtro y, por tanto, su spin debe ser hacia arriba. Mientras el segundo protón está en camino, su spin está formalmente indeterminado. Sin embargo, el observador puede conocer el spin del segundo protón desde el instante en que ha detectado el primero. Si el primero tenía spin hacia arriba, entonces, de acuerdo con las reglas para el estado singlete, el segundo debe tener spin hacia abajo. El observador sabe que cuando se alcance el segundo detector, el protón no será registrado.

Suele afirmarse que, según la mecánica cuántica, las propiedades de una partícula no pueden medirse sin perturbarla de alguna forma. Sin embargo, parece ser que el spin del segundo protón se ha determinado mediante un experimento que no interactúa en absoluto con él. La única medición se ha conseguido sobre otro protón situado en un lugar distinto, tal vez bastante alejado. El único cambio aparente que resulta de esta medida está en el conocimiento del sistema por el observador, y a pesar de todo parece que transforma el segundo protón de un estado indeterminado a otro estado completamente determinado.

Einstein y sus colaboradores propusieron este experimento a fin de demostrar la insuficiencia de la mecánica cuántica. Es un hecho bien conocido que Einstein nunca estuvo de acuerdo con la mecánica cuántica, aunque en el artículo de 1935, escrito junto con Podolsky y Rosen, no discutió la exactitud de las predicciones de la teoría; sólo sostuvo que ésta era incompleta y debía verse como provisional. El spin de ambos protones tenía que estar completamente determinado en cualquier instante, afirmó, y es ambiguo en la descripción mecánico cuántica si advertimos que existen ciertas "variables ocultas" cuyo valor desconoce el observador. Si pudiesen tenerse en cuenta todas las condiciones iniciales del experimento, incluidas las variables ocultas, las expresiones estadísticas de la mecánica cuántica seguirían siendo válidas, pero podrían ser reemplazadas por una teoría determinista más fundamental.

Durante unos 30 años, las teorías sobre las variables ocultas se investigaron únicamente de forma esporádica, permaneciendo éstas como un posible sucesor de la mecánica cuántica. Sin embargo, en 1965 John S. Bell, de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), probó un teorema que afirmaba que ninguna teoría determinista del estilo imaginado por Einstein podía reproducir todos los resultados estadísticos de la mecánica cuántica. Bell necesitaba que estas teorías verificaran una condición adicional (que también necesitó Einstein): debían satisfacer la propiedad llamada localidad, que prohíbe la acción a distancia. La demostración de Bell reveló que la correlación de los spines esperada en la mecánica cuántica sólo puede presentarse en una teoría determinista si hay comunicación entre los dos detectores. En ciertas ocasiones, esta comunicación se transmitiría a una velocidad mayor que la de la luz, y por esto violaría no sólo la condición de localidad sino también la teoría especial de la relatividad.

Einstein intentó que su razonamiento fuese entendido como un "experimento teórico" en el que se emplearía un aparato ideal. Estos procedimientos imaginarios fueron importantes para el desarrollo de la mecánica cuántica, pero la mayoría de ellos serían imposibles de llevar a cabo en la práctica. Sin embargo, el experimento de Einstein, Podolsky y Rosen, con ciertos arreglos, se ha podido realizar en el laboratorio. La ineficacia de los filtros de spin y de los detectores existentes hace necesario introducir nuevas hipótesis que debilitan algo este razonamiento, pero ninguna de estas hipótesis parece inverosímil.

Ya se han realizado siete experimentos de este tipo, por lo menos. Sólo uno de ellos empleaba pares de protones; los demás utilizaban pares de fotones, o cuantos de radiación electromagnética, que tienen un spin cuya orientación se observa de igual forma que la polarización. Aunque pueden crearse con facilidad tanto pares de protones como de fotones en el estado singlete, se han escogido los fotones preferentemente porque su spin puede analizarse con mayor facilidad.

Los resultados de los siete experimentos no son inequívocos: cinco están de acuerdo con las predicciones de la mecánica cuántica y los otros dos no. John F. Clauser, del Lawrence Livermore Laboratory de la Universidad de California, y Abner Shimony, de la Universidad de Boston, han examinado estos descubrimientos en un reciente artículo. Así, han presentado argumentos que atribuyen los dos resultados anómalos a errores sistemáticos en los experimentos. Señalan que ninguno de los siete experimentos puede considerarse definitivo por sí solo, pero el peso de la prueba apoya el punto de vista de la mecánica cuántica.

Si, como es de esperar, se confirmasen las predicciones de la mecánica cuántica, ¿cuáles serían las consecuencias para la física y la filosofía? Un camino para resolver este conflicto es abandonar el principio de localidad y permitir la acción instantánea a distancia, aunque la mayor parte de los físicos rechazarían tal posibilidad. La alternativa es renunciar a la perspectiva de construir una teoría determinista y objetiva de la física atómica y subatómica. En realidad el spin del segundo protón está indeterminado —el mismo protón no "sabe" cómo gira— hasta que el observador hace la primera medida; por lo tanto, el spin está completamente determinado.

Algunas de las primeras formulaciones de la mecánica cuántica hacían jugar cierto papel a la mente del observador. La gran dificultad conceptual de esta teorías es que no existe una razón manifiesta para que la intervención humana se entrometa en un descripción del movimiento de una partícula inanimada. Realmente, si hay que evitar un total retorno al solipsismo, tendremos entonces una excelente razón para creer que las partículas obedecían las mismas reglas mecánico cuánticas antes de la presencia de ningún observador humano.

Es necesario recalcar que en mecánica cuántica el conocimiento por el observador no puede, en ningún caso, alterar el resultado de una medida real. El segundo spin puede permanecer indeterminado hasta que sea resuelto por una medida realizada en otro lugar distante, pero no puede estar hacia arriba al principio y después definitivamente hacia abajo. No hay indicio alguno de la influencia de la "mente sobre la materia". Esta ligadura a la influencia del observador sugiere cuál puede ser la interpretación menos desconcertante de los experimentos. Bell ha descrito esta explicación como una "retirada hacia la ortodoxia de Copenhague de la mecánica cuántica", iniciada por Niels Bohr en su réplica a Einstein, Podolsky y Rosen. Bohr mantuvo que la teoría cuántica especifica, en un experimento, sólo aquellas cantidades que son realmente observadas; hasta que el observador no ha decidido qué cantidades va a medir y ha

obrado en consecuencia con esta decisión, no se ha realizado el experimento. Para Bohr la pregunta de qué ocurre antes de realizar la medida está simplemente fuera de nuestros límites. Por este camino se evita la paradoja, aunque queda permanentemente excluida de la investigación cierta zona de la realidad, no muy grande.

Optica activa

La astronomía moderna ha sacado un extraordinario partido de los nuevos instrumentos que concentran radiación situada más allá del espectro visible, tanto en longitudes de onda mayores como menores; aunque el grueso de la tradición en la instrumentación astronómica gira en torno al gran telescopio que concentra la luz. Puesto que el espectro visible está centrado en una longitud de onda de medio micrometro aproximadamente, las superficies de las lentes y de los espejos deben tener una precisión de alrededor de un cuarto de esta longitud de onda, si se quiere que den imágenes de buena calidad. Los espejos de los grandes telescopios deben ser completamente rígidos, pues la superficie de los mismos ha de mostrarse resistente a la distorsión. Se sabe perfectamente que los espejos de los grandes telescopios son muy difíciles de construir; cuanto mayor es el telescopio más se complican los problemas. Ya está a punto de realizarse un nuevo método para abordar el diseño de un telescopio en el Mount Hopkins Observatory en Arizona: un telescopio formado por varios espejos que substituyan al único y grande usual. El Telescopio de Espejos Múltiples (MMT, del inglés "Multiple Mirror Telescope") es un proyecto conjunto de la Universidad de Arizona y del Smithsonian Astrophysical Observatory. Cuando entre en funcionamiento, hacia finales de este año, cerrará el trío de los grandes telescopios ópticos del mundo.

El Telescopio de Espejos Múltiples consiste, básicamente, en seis espejos de 72 pulgadas (1828,80 milímetros) dispuestos en hexágono. Las imágenes formadas por los distintos espejos se reúnen en un solo punto, de modo que, en conjunto, los seis espejos tienen una capacidad de concentración de la luz equivalente a la de un telescopio único de 176 pulgadas (4470,40 milímetros). Las imágenes procedentes de esos seis espejos se envían a otro espejo secundario que tiene seis lados y está situado en el eje central del telescopio; este espejo envía, a su vez, las imágenes hacia un foco final común. Un sistema de "óptica activa", o mecanismo de realimentación, mantiene los seis espejos principales perfectamente alineados.

Esto se consigue dividiendo un haz láser en seis, cada uno de los cuales se dirige a uno de los espejos. Las posiciones relativas de los haces reflejados son captados por una serie de detectores unidos a un computador. Si aparece alguna discrepancia debida a deformaciones de origen térmico o gravitatorio, el computador activa un servomecanismo que hace oscilar el espejo secundario o que lo mueve hacia atrás o hacia adelante, a fin de mantener los seis espejos principales localizados en el mismo punto. Aunque las fluctuaciones causadas por las deformaciones de origen térmico o gravitatorio son bastante pequeñas, el sistema de realimentación puede corregir un error en 0,05 segundos.

Un problema que entraña mayor dificultad es el de compensar, en un frente de ondas, los errores de fase o de longitud del camino causados por la turbulencia atmosférica, que es el principal factor que limita el rendimiento de los telescopios emplazados en la superficie terrestre. En un intento por salvar este incoveniente se han venido desarrollando, desde la década anterior, sistemas de óptica activa que detectan errores en un frente de ondas y que los compensan en milisegundos en "tiempo real", es decir, mientras las fluctuaciones están en marcha. John W. Hardy, de la Itek Corporation, escribe sobre el particular en *Proceedings of the IEEE*, analizando el estado de esta nueva técnica.

Todos los sistemas de óptica activa de tiempo real entrañan un lazo de realimentación que consta de tres componentes: un sensor que detecta los errores en el frente de ondas, un computador que recibe los datos medidos y los convierte en señales de control y un espejo "activo" cuya curvatura puede ser modificada, o que puede ser ladeado a fin de compensar el error de fase detectado. Se han desarrollado dos tipos de espejos activos: consiste el primero en una serie de espejos menores, cada uno de los cuales puede oscilar según dos ejes y moverse según un tercer eje de focos; se trata el segundo de un único espejo delgado que puede deformarse por medio de un conjunto de pistones que presionan sobre su superficie posterior. Para obtener compensaciones de alta velocidad del frente de onda, tales como la requerida para corregir la turbulencia atmosférica, se reúne la luz mediante un gran espejo y se hace llegar a un espejo más pequeño, que puede ser deformado en los tiempos del orden del milisegundo requeridos para las correcciones de fase.

El sensor es un interferómetro de corte, que toma el frente de ondas generado por una única fuente intensa (como una estrella brillante) y lo divide en dos haces, uno de los cuales está desplazado respecto al otro. Se obtiene un modelo de interferencia formado por "franjas" claras y oscuras, de suerte que los errores de fase se convierten en diferencias de intensidad. Una serie de fotodetectores distribuidos sobre la abertura del sistema captan las diferencias de intensidad y transmiten señales eléctricas al computador. Luego, el computador ordena, por ejemplo, al conjunto de pistones situados detrás de un espejo delgado que lo deformen hasta su corrección.

Debido a que el sensor necesita una gran cantidad de luz para analizar las turbulencias en tiempo real, el sistema sólo puede operar con fuentes luminosas brillantes; por ello, su empleo en astronomía es muy limitado. Sin embargo, existen muchas otras posibles aplicaciones; verbigracia: mejorar la propagación de un haz láser a través de la atmósfera o de otro gas, tanto para las comunicaciones como para diferentes propósitos (por ejemplo, las armas basadas en el láser o la fusión mediante láser).

Se puede focalizar un haz láser en un área muy pequeña; existen, sin embargo, dos fuentes de aberración que pueden destruir la coherencia de su frente de ondas: las fluctuaciones térmicas en el transmisor y la turbulencia del gas situado entre el transmisor y el receptor. Estas fuentes de aberración pueden corregirse mediante un sistema de óptica activa que se incorpore en el circuito del láser. Para controlar la turbulencia atmosférica en tiempo real, se enfoca un telescopio sobre el blanco distante al que se está dirigiendo el haz láser; de esta forma se mide la distorsión del haz causada por la turbulencia, y se compensa distorsionando el haz antes de que abandone el transmisor. La fusión mediante láser consiste en concentrar un conjunto de haces láser sobre una gotita de deuterio para provocar la reacción de fusión; los sistemas de óptica activa de tiempo real podrían mejorar la eficacia de este proceso.

La viabilidad de los grandes complejos ópticos en el espacio (tales como colectores de energía solar en órbita) depende del desarrollo de sistemas ópticos de poco peso altamente estables. Uno de estos sistemas podría tener una envergadura de decenas de metros que debería mantenerse firme con un pequeño error de escasos micrometros.

Puesto que el sistema estaría sujeto a la acción de fuerzas perturbadoras, especialmente en el lanzamiento y puesta en órbita requeriría, a buen seguro, un control de "óptica activa". Hardy concluye: "si se mantiene el ritmo de progreso actual en la óptica activa, en los próximos diez años podrían realizarse la mayor parte de estas aplicaciones".



El tomate

La especie Lycopersicon esculentum, *considerada antaño como venenosa, se ha convertido en un extenso cultivo alimentario y en fuente de vitaminas y minerales, merced a una amplia modificación genética y a nuevas técnicas de producción*

Charles M. Rick

El tomate (fruto casi universalmente considerado como hortaliza y planta perenne generalmente cultivada como anual) es objeto de una amplia industria agrícola. Entre los vegetales cultivados para el consumo humano en los Estados Unidos, en 1977, la plantación comercial de tomates alcanzó aproximadamente las 220.000 Ha (sobrepasadas tan sólo por el maíz), produjo 7.943.400 Tm (no sobrepasadas por ningún cultivo) y se valoró en 914,1 millones de dólares (valor máximo para todas las cosechas). Estas cifras no comprenden la gran cantidad de tomates cultivados en los jardines domésticos. Cuesta entender ahora, cuando el tomate goza de gran aceptación popular, como alimento por sí mismo y como ingrediente de sopas, salsas (incluido el universal jugo de tomate) y bebidas, que no hace siquiera un siglo se le rechazara en muchísimos sitios por suponerlo venenoso, dado su conocido parentesco con la hierbamora, el beleño, la belladona y otros miembros de la familia de las Solanáceas. Todavía por los años 20 el consumo per cápita de tomates en los Estados Unidos era solamente de 8,2 kilógramos por año; en la actualidad es de 25,5 kilogramos (la mayor parte en diversas formas de conserva), aumento éste de un 300 por ciento durante un período en el que el consumo de patatas, por ejemplo, ha disminuido un 20 por ciento. La historia de la evolución del tomate, desde ser considerado un fruto exótico a ser un componente popular de la dieta y artículo comercial de mayor consumo, ha sufrido unos virajes interesantes.

Todas las formas cultivadas de tomate derivan básicamente de la especie *Lycopersicon esculentum*. Como suele suceder con las plantas cultivadas, los orígenes y los primeros pasos de su domesticación permanecen bastante obscuros. Sin embargo, se puede tener cierta seguridad sobre tres aspectos. Primero, el tomate cultivado se originó en el Nuevo Mundo, ya que todas las especies silvestres relacionadas con el tomate son nativas de la región andina que hoy comparten Chile, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú. Segundo, el tomate alcanzó un avanzado estado de domesticación antes de ser conocido en Europa. Grabados pertenecientes a los herbarios más antiguos revelan que los primeros tipos cultivados en Europa tenían frutos grandes. (En todas las especies silvestres el fruto es pequeño.) De acuerdo con las descripciones ya se conocían una amplia gama de tamaños, formas y colores. Tercero, el antecesor más directo, el tomate-cereza silvestre (*L. esculentum* variedad *cerasiforme*) es espontáneo en toda América tropical y subtropical y se ha extendido a lo largo de los trópicos del Viejo Mundo.

La época, lugar y otros aspectos de la domesticación son mucho menos seguros. A pesar de que faltan pruebas definitivas, el peso de los datos procedentes de diversas fuentes señalan a México como región probable de domesticación. Una comparación de las variantes enzimáticas hereditarias revelan una similitud mucho mayor entre las antiguas variedades domésticas europeas, las variedades domésticas primitivas y los tomates silvestres de México y América Central, que entre las variedades domésticas europeas y las plantas primitivas de la región andina que, indudablemente, es el centro de irradiación del género *Lycopersicon* y la otra posible área de domesticación. No se han encontrado representaciones del tomate en la cerámica y otros utensilios primitivos de la región andina, ni tampoco se han hallado restos de esta planta en los yacimientos arqueológicos de la región, mientras que sí se han localizado partes de la mayoría de las plantas nativas cultivadas. El tomate carece de nombre nativo en la región andina, en tanto que se conoce en la lengua nahua de México como *tomatl*, término que es sin duda el origen del nombre moderno.

Las primeras crónicas del Nuevo Mundo son desgraciadamente escasas en sus referencias a los tomates. El cronista peruano Guamán Poma menciona el consumo esporádico del fruto del tomate silvestre en el imperio inca, pero no hace mención de tipos de fruto grande. El nombre de *mala peruviana*, que se aplicó al tomate tras su introducción en Italia, ha sido origen de confusión sobre la región de domesticación de dicha planta. A pesar de que el nombre no tiene, según parece, una base fundamentada, ha desorientado a los fitogeógrafos.

La primera mención del tomate en el Viejo Mundo se debe a las descripciones publicadas en 1554 por el herborista Pier Andrea Mattioli. La misma precocidad de esta fecha apoya la teoría de un origen mexicano, habida cuenta de que la ciudad de México se tomó en 1519, que la conquista completa del Perú se fecha en 1531 y atendiendo al tiempo probable necesario para la introducción, cultivo y valoración de la cosecha en Europa. La edición de 1554 del herbario de Mattioli establece que el tomate "se come en Italia con aceite, sal y pimienta". La planta se llamó primero *pomi d'oro* y *mala aurea* (manzana de oro) y también *poma amoris* manzana del amor). Estos y otros nombres equivalentes persistieron hasta bien entrado el siglo XIX.

Supersticiones persistentes

Las referencias al consumo del tomate son bastante raras. En muchos sitios la planta y su fruto fueron notablemente lentos en ganar la aceptación, excepto como planta ornamental, medicinal o simple curiosidad. La gente ya sabía de su relación con los miembros venenosos de la familia de las Solanáceas, como la belladona y la

PLANTA DEL TOMATE, *Lycopersicon esculentum*. **Se encuadra en la familia de las Solanáceas, que comprende la patata, el tabaco y la petunia, así como la hierbamora, belladona y otras plantas venenosas. Esta es una típica planta de tomate "indeterminada", es decir, que lleva al mismo tiempo flores y frutos en diversos estados de madurez y crece hasta que la aniquilan las heladas. (Dibujo realizado por E. Kotschnig.)**

mandrágora. El herborista Matthias de L'Obel dictó en 1581 una sentencia típica: "Algunos italianos comieron estas manzanas como si fueran melones, pero el fuerte hedor que desprendían da suficiente información de lo insalubres y perniciosas que resultan en la alimentación".

Estas supersticiones infundadas persistieron ampliamente hasta el mismo siglo XX en muchas regiones, incluyendo los Estados Unidos, donde la planta fue introducida por los colonos. La primera mención registrada allí data de 1710; se debe a William Salmon, en su *Botanologia, the English Herbal, or History of Plants*. La siguiente mención impresa que nos ha llegado corresponde a Thomas Jefferson, quien en 1782 escribió sobre los cultivos de tomate en Virginia. Jefferson hizo también frecuentes referencias al cultivo y usos culinarios de los "tomatas" en Monticello, en su libro de jardinería, que escribió entre 1809 y 1814. Un tal Robert Gibbon Johnson, que no es conocido por nada más en la historia, logró cierto grado de celebridad (y dio un gran paso por la causa del tomate como alimento) al comerse uno en las escaleras de la Corte de Justicia de Salem, New Jersey, en 1820.

La toxicidad de ciertos miembros de la familia de las Solanáceas está producida por alcaloides. El alcaloide predominante en el tomate es la tomatina, que se encuentra en elevada concentración en el follaje y en el fruto verde y que se degrada a componentes inertes al madurar el fruto. (Incluso a grandes dosis es mucho menos peligroso que los alcaloides de la hierbamora, la belladona y otras especies.) Posiblemente gracias a la solidez de las primeras investigaciones sobre las plantas con alto contenido en tomatina, que descubrieron que tenían una mayor resistencia a la enfermedad de marchitamiento causado por el hongo *Fusarium oxysporum*, se han hibridado en la actualidad variedades de *Lycopersicon esculentum* y de la especie muy afín *L. pimpinellifolium* para producir altos niveles de tomatina en ungüentos indicados para el tratamiento de enfermedades fúngicas de la piel humana.

Después incluso de haberse empezado a aceptar el tomate como alimento, persistió el debate sobre si se trataba de una fruta o una verdura. (Botánicamente es un fruto, ya que se desarrolla a partir de un ovario.) En 1893 esta cuestión llegó al Tribunal Supremo de los Estados Unidos. El oficial de aduanas del Puerto de Nueva York aplicó un impuesto del 10 por ciento a unos tomates importados de las Indias Occidentales; los clasificó como "hortalizas en su estado natural", que la ley de tarifas de 1883 gravaba con impuestos. La misma ley determinaba que los "frutos verdes, maduros o secos" estaban libres de tasas, y los importadores litigaron porque sus tomates debían haber entrado en el país sin pagar derechos de aduana.

El Juez Asociado Horace Gray dio la opinión unánime de la Corte. "Botánicamente hablando", escribió, "los tomates son el fruto de una planta, como lo son también los pepinos, las calabazas, las alubias y los guisantes. Pero en el lenguaje común del pueblo, tanto entre los vendedores como los compradores de víveres, todos ellos son hortalizas, ya que crecen en huertas y que, cuando se comen cocidos o crudos, como las patatas, zanahorias, chirivías, nabos, coles, coliflores, berzas, apio y lechugas, se sirven generalmente dentro de la comida, en o tras la sopa, el pescado o la carne, que constituyen la parte principal del refrigerio y no como postre, como si fuera una fruta".

La popularidad actual del tomate en los Estados Unidos es difícil de explicar por puras razones nutritivas. El tomate no ocupa ningún lugar destacado en cuanto a concentración de componentes dietéticos se refiere. Por ejemplo, de acuerdo con un informe reciente de M. Allen Stevens, de la Universidad de California en Davis, entre los principales frutos y hortalizas, el tomate ocupa el decimosexto lugar como fuente de vitamina A, y el treceavo como fuente de vitamina C. En términos de consumo, sin embargo, los tomates son la tercera fuente de ambas vitaminas en los Estados Unidos. Esta aparente anomalía se explica por el volumen relativamente alto de tomates consumidos. Es más, el tomate ocupa el puesto preferente en el total de vitaminas y minerales de la dieta de los Estados Unidos.

La popularidad del tomate se explica mucho más fácilmente en razón de su color atractivo y aroma y de su versatilidad. Como ingrediente de una gran variedad de alimentos, desde la pizza al Bloody Mary, el tomate se ha convertido en un comodín de la dieta.

Variación genética

El tomate cultivado es una de las nueve especies pertenecientes al género *Lycopersicon*. A pesar de que su consumo está prácticamente limitado a las variedades domésticas de *L. esculentum*, se utilizan también, aunque en menor cantidad, los frutos de la variedad silvestre *cerasiforme* y de la especie afín *L. pimpinellifolium*. Los frutos de otras especies tienen colores y sabores menos atractivos que el *L. esculentum*. Mucha gente los encuentra francamente repugnantes.

Las especies silvestres tienen un gran valor potencial, dada la diversidad de su plasma germinal. Han sido hibridadas con formas cultivadas por el interés de sus

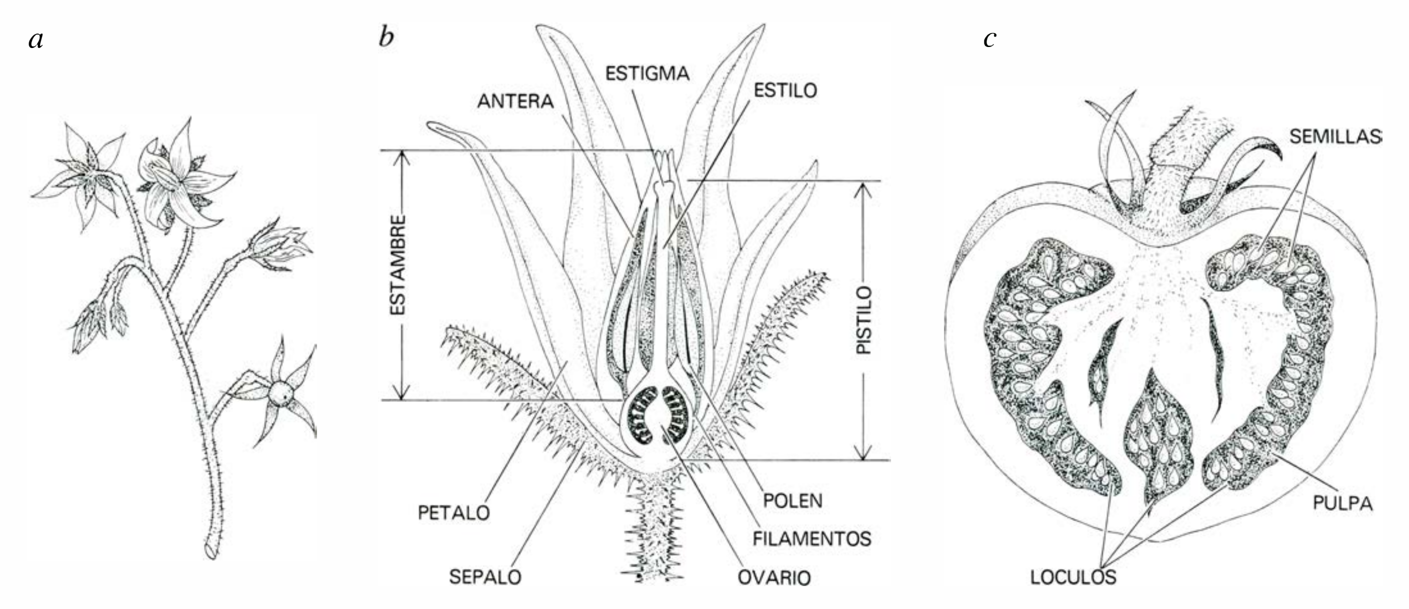
CONCENTRACION DE NUTRIENTES

CULTIVO	CLASIFICACION
BROCULI	1
ESPINACAS	2
COLES DE BRUSELAS	3
HABAS DE LIMA	4
GUISANTES	5
ESPARRAGOS	6
ALCACHOFAS	7
COLIFLOR	8
BATATAS	9
ZANAHORIAS	10
MAIZ	12
PATATAS	14
COL	15
TOMATES	16
PLATANOS	18
LECHUGAS	26
CEBOLLAS	31
NARANJAS	33

CONTRIBUCION DE NUTRIENTES A LA DIETA

CULTIVO	CLASIFICACION
TOMATES	1
NARANJAS	2
PATATAS	3
LECHUGAS	4
MAIZ	5
PLATANO	6
ZANAHORIAS	7
COL	8
CEBOLLAS	9
BATATAS	10
GUISANTES	15
ESPINACAS	18
BROCULI	21
HABAS DE LIMA	23
ESPARRAGOS	25
GUISANTES	30
COLES DE BRUSELAS	34
ALCACHOFAS	36

VALOR NUTRITIVO DEL TOMATE, que no es particularmente alto. Ocupa el puesto 16 en concentración relativa de un grupo de 10 vitaminas y minerales, según M. A. Stevens, de la Universidad de California en Davis. Sin embargo, como los tomates se consumen en gran cantidad, ocupan el primer lugar en la contribución total de estos nutrientes en la dieta de los Estados Unidos. El esquema contiene los 10 primeros alimentos en concentración de nutrientes y los primeros 10 en contribución total. A pesar de que el bróculi, las espinacas y coles de Bruselas son los más alimenticios, no aparecen entre los más consumidos.



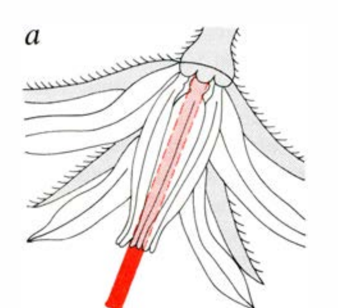
FLORES DEL TOMATE, agrupadas en racimo (*a*). Contienen ambos órganos, masculinos y femeninos (*b*). Los granos de polen de la antera se adhieren al estigma, germinan y liberan los núcleos espermáticos que, conducidos al ovario a través del estilo, fecundan el óvulo, que se transformará en semilla. Merced a esta estimulación el ovario se convierte en fruto. El fruto maduro (*c*) contiene cierto número de lóculos o celdillas rellenos de semillas, según puede apreciarse.

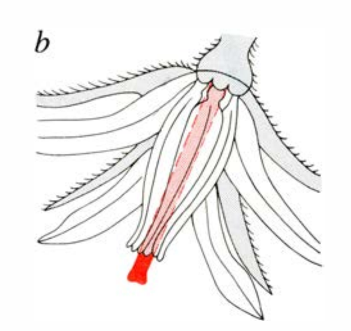
genes de resistencia a diversas enfermedades y para mejorar el color y la calidad de sus frutos. Muchas variedades así mejoradas se cultivan en gran escala. En California, por ejemplo, los cultivos están limitados principalmente a las variedades que resisten la marchitez causada por hongos fusariáceos y verticiláceos. Está en vías de desarrollo la hibridación para la resistencia a otras plagas.

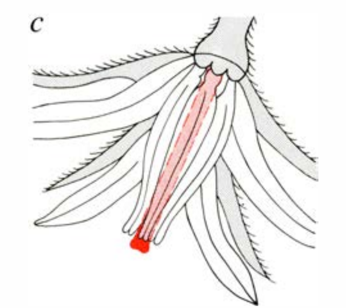
La gran diversidad inter e intraespecífica del tomate promete muchos más logros en este aspecto. Un ejemplo de ello es la gran tolerancia a la salinidad que se ha descubierto en tipos de *L. cheesmanii*, que prosperan en las costas de las Islas Galápagos, a dos metros escasos por encima de la línea de marea alta, y a cinco metros de distancia. Pruebas realizadas por Dale Rush y Emanuel Epstein, de la Universidad de California en Davis, han demostrado que estas formas pueden sobrevivir en agua marina, mientras que las variedades cultivadas mueren si la concentración de agua de mar supera el 50 por ciento. Rush y Epstein han descubierto también que la tolerancia a la sal está en los tejidos de la planta, y no proviene de ningún mecanismo de barrera a la captación de sal o a su transporte por la planta.

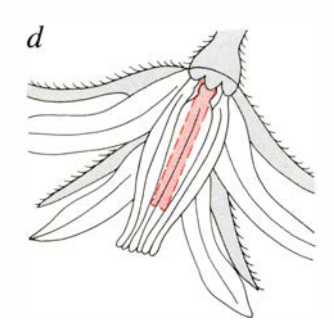
Otra especie, *Solanum pennellii* (a pesar del nombre está relacionada más íntimamente con los tomates que con la hierbamora) florece en hábitats extremadamente secos del Perú occidental, donde las principales fuentes de agua son la niebla y el rocío. Pruebas verificadas por A. T. T. Yu, de la Universidad de California en Davis, han revelado que la planta tolera bien este ambiente porque su follaje resiste las pérdidas de agua. Nuestros propios experimentos en Davis indican que este carácter puede introducirse por hibridación en los tomates cultivados. Otras características interesantes de los tomates silvestres son la resistencia a los insectos en la especie *L. hirsutum* y la tolerancia a la humedad, condiciones tropicales en ciertas variedades de *cerasiforme*.

Por numerosas razones, el tomate se ha convertido en tema favorito de estudios genéticos. Uno de esos motivos es la gran riqueza de variabilidad que se da de modo natural en las especies. El suministro de variedades se ha incrementado notablemente mediante mutaciones inducidas por rayos X, etilmetansulfonato y otros agentes mutagénicos, en los que están trabajando de modo notable Hans Stubbe y sus colegas en Alemania Oriental. Otras características que aumentan la utilidad de los tomates para estudios genéticos es la alta tasa de autopolinización de la planta, que conduce a una pronta expresión de las mutaciones recesivas, la facilidad de hibridaciones controladas y la falta de duplicación génica en la arquitectura genética del vegetal. Además, el cultivo de la planta no encierra ninguna complejidad, tiene un ciclo vital corto y produce abundantes semillas. Una gran ventaja, en estos estudios, la constituye un estado favorable de paquiteno en la meiosis, que permite la identificación de cada uno de los doce cromosomas de la planta y de sus brazos. Las









EVOLUCION DE LA LONGITUD DEL ESTILO (*color*). La inclinación normal del tubo de la antera determina que el polen sea liberado hacia el interior de la abertura. En las especies ancestrales (*a*), que no se reproducían por autopolinización, la posición del estigma facilitaba la polinización cruzada por insectos. El estilo es más corto en *L. esculentum* variedad *cerasiforme*, probable antepasado silvestre del tomate cultivado, y en las primitivas variedades cultivadas (*b*); pero aún lo es más en muchas variedades domésticas europeas y norteamericanas (*c*). En las nuevas variedades de California (*d*) la retracción del estigma dentro del tubo incrementa la probabilidad de autofecundación y elimina casi toda posibilidad de polinización cruzada. (Dibujos de Ilil Arbel.)

investigaciones realizadas hasta la fecha han proporcionado unos mapas cromosómicos que se encuentran entre los mejores obtenidos en plantas con flores.

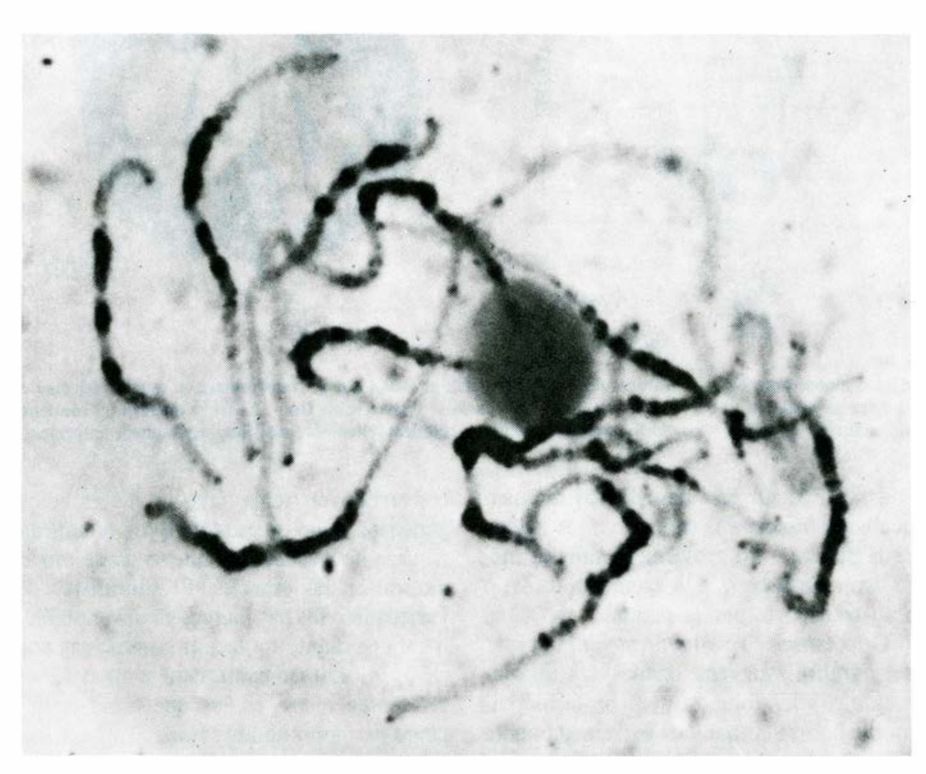
La investigación de la naturaleza de la variabilidad genética de *L. esculentum* ha facilitado la obtención de formas mejoradas de esta especie y ha abierto nuevas perspectivas en la evolución de las formas cultivadas. Los estudios se han basado generalmente en variaciones fácilmente detectables de la forma de plantas y hojas, de la forma y color del fruto y de otras características morfológicas importantes. Recientemente se ha conseguido un avance destacado en el ensayo de alelos de quince genes que codifican síntesis de enzimas que fácilmente se detectan por electroforesis en gel de almidón.

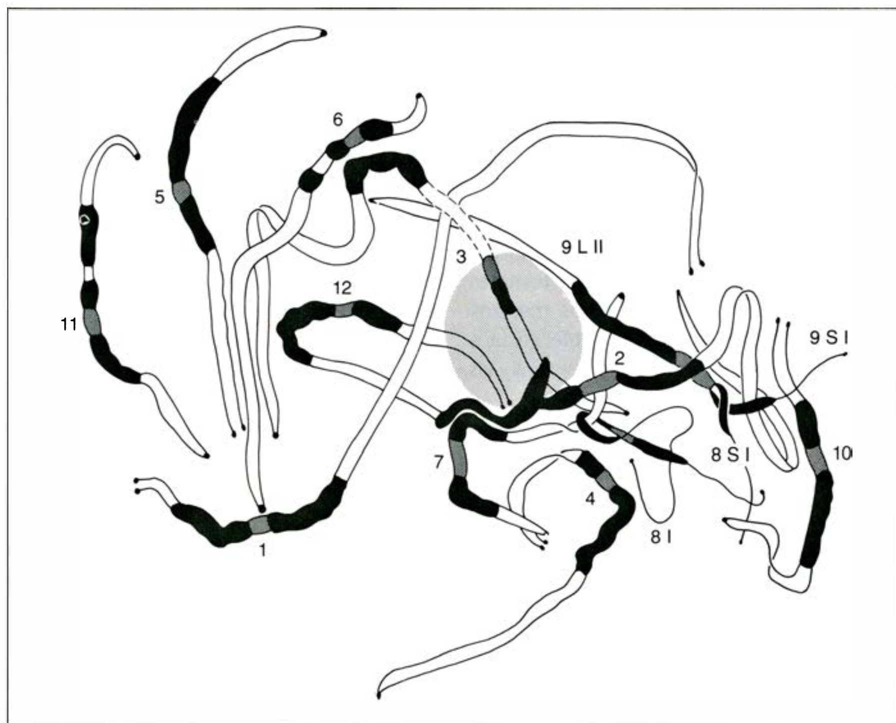
La conclusión de estos estudios es que, fuera de su región nativa en el este sudamericano, las formas cultivadas y silvestres de *L. esculentum* son notablemente homogéneas (descartando, por supuesto, la variabilidad resultante de recientes hibridaciones con formas nativas). Se encuentra mucho más variación en la región originaria, tanto entre accesiones ("accessions") como en el seno de las mismas. Se pueden aducir algunas razones para explicar estas diferencias de variabilidad: hibridación con especies silvestres en la región nativa; actividad acrecentada de los insectos polinizadores, que promueven una mayor hibridación interespecífica en la zona originaria; efectos de la selección artificial; mayor período de existencia en la región indígena, lo que permite la acumulación de más variantes genéticas y deriva genética en la larga emigración desde Sudamérica a través de América Central y México, sin duda acoplada con una restricción posterior, impuesta por selección natural, a un número limitado de genotipos prósperos.

La deriva genética y la selección fueron acompañados por una secuencia de modificaciones en la estructura floral *(véase la ilustración inferior de la página anterior).* Como sus antecesoras silvestres, las variedades latinoamericanas tenían, generalmente, estigmas sobresalientes que facilitaban la polinización cruzada. La selección para mejorar el cuajado del fruto condicionó probablemente un acortamiento del estilo, tras la introducción de los tomates en Europa. A medida que el tomate irradió hacia el norte y, sobre todo en las zonas donde se cultivó en invernaderos, los estigmas de la abertura del tubo de la antera fueron seleccionados sin que mediara un plan previo; ello ocasionaría una disminución de la dependencia de la polinización por los insectos y el viento.

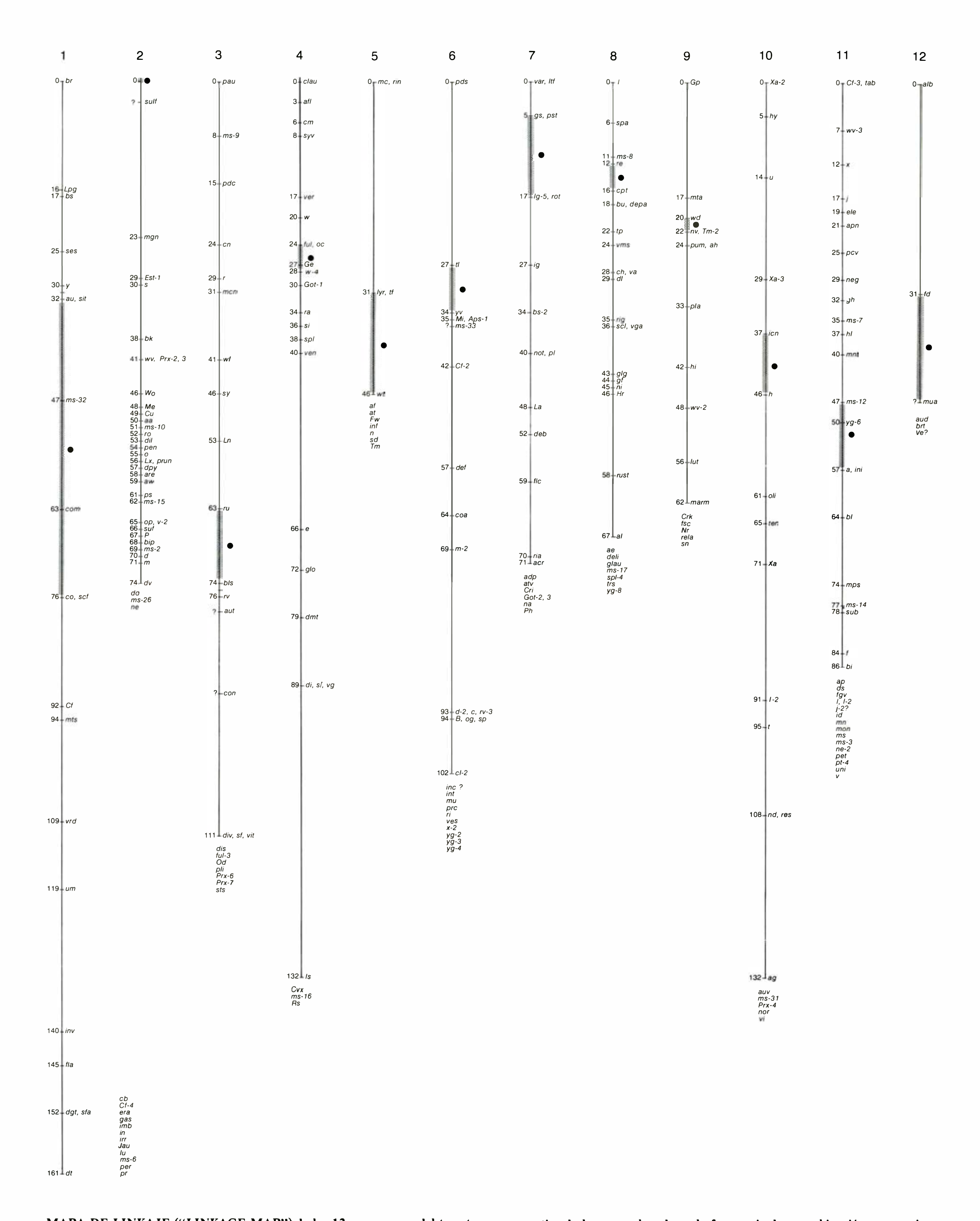
La última etapa de esta secuencia ha sido la reciente fijación genética, en las variedades domésticas de California, de un estilo mucho más corto, que sitúa el estigma dentro del tubo de la antera, facilitando enormemente la autopolinización y eliminando virtualmente la probabilidad de polinización cruzada.

El tomate es un modelo de mejoras espectaculares en producción y en otras características logradas por hibridación de variedades domésticas, acoplada a una inteligente manipulación de métodos de cultivo. Los testimonios más antiguos sobre los esfuerzos para seleccionar los mejores tipos se remontan a trabajos realizados en

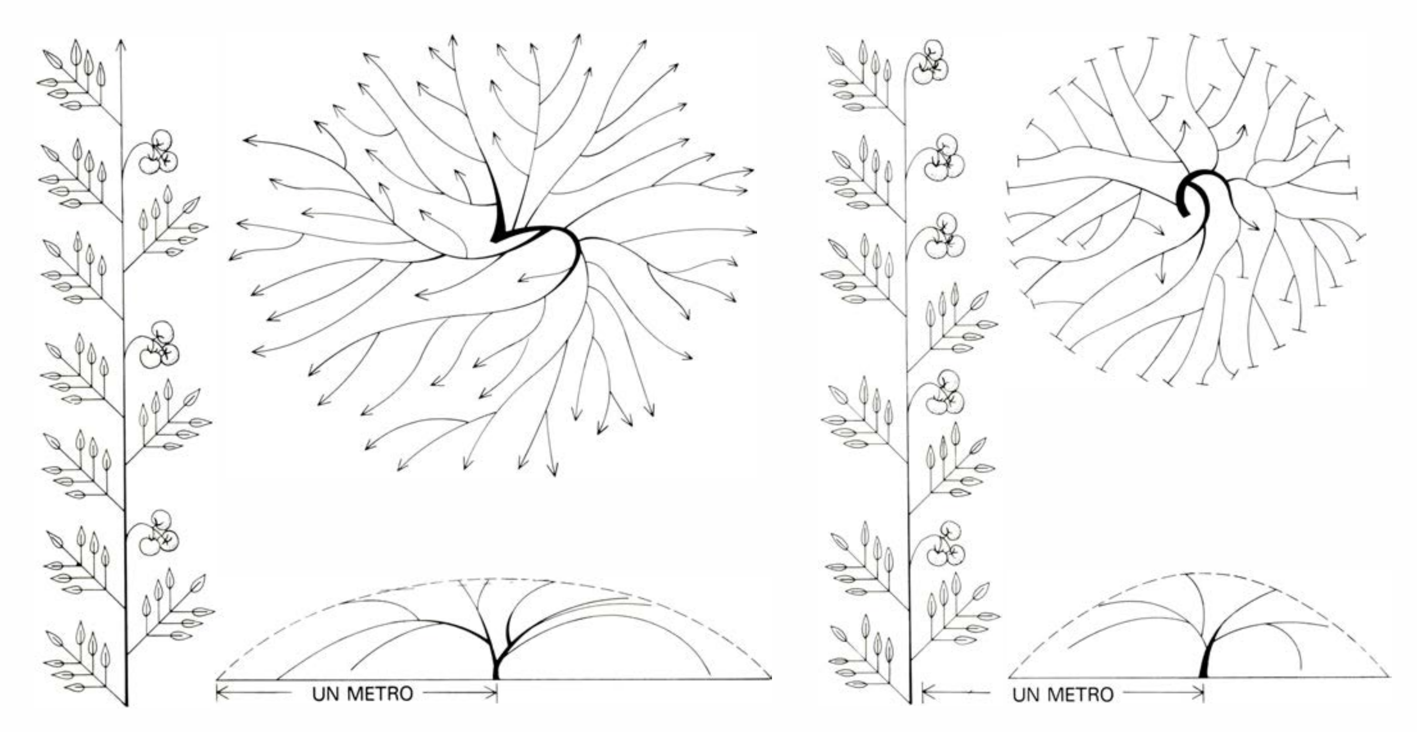




CROMOSOMAS DEL TOMATE, aumentados unas 2000 veces en una microfotografía *(arriba)* y en un diagrama *(abajo),* en el estado de paquiteno de la meiosis, cuando los granos de polen empiezan a formarse. Los cromosomas homólogos están apareados; se visualiza, pues, el número haploide de 12 cromosomas bivalentes. Los centrómeros parduscos están rodeados por heterocromatina inactiva, manchada de obscuro, y por regiones activas brillantes (eucromatina). El corpúsculo difuso del centro es un nucléolo. Existe una translocación recíproca entre los cromosomas número 8 y número 9; un brazo largo del número 8 y un brazo corto del número 9, que se han intercambiado, muestran regiones univalentes (*I*), que no se han apareado. El material ha sido preparado por G. S. Khush, que se encuentra en la Universidad de California en Davis.



MAPA DE LINKAJE ("LINKAGE MAP") de los 12 cromosomas del tomate con los alelos mutantes que se han identificado en cromosomas particulares y que, en la mayoría de los casos, se han localizado, uno respecto al otro, en un determinado cromosoma. La región gris marcada con un punto sitúa el centrómero de cada cromosoma, el lugar que controla ciertos movimientos de los mismos. Los números son "unidades de mapa" que muestran la localización respectiva de los genes, basada en la frecuencia de recombinación en experiencias genéticas; los genes que no han podido ubicarse se relacionan al final de cada cromosoma. Los genes controlan una amplia variedad de caracteres. En el locus 94 del cromosoma número 6, por ejemplo, el gen *B* codifica el color naranja; el gen *sp* (de "autopoda") determina en el vegetal un crecimiento ordenado, compacto y definido *(véase la ilustración de la página siguiente).*



COMPARACION de las características del crecimiento de una planta normal indeterminada *(izquierda)* **y de otra determinada cuyo porte está codificado por el gen recesivo** *sp (derecha).* **Se distinguen por el propio tallo: en vez de las tres hojas nodales y una inflorescencia por cada segmento del tallo principal, el tallo determinado desarrolla progresivamente menos hojas nodales por segmento y termina en una inflorescencia. Las plantas maduras, mostradas diagramáticamente desde arriba y lateralmente, tienen una morfología diferente; la planta normal se extiende indefinidamente, mientras que la planta** *sp* **cubre menos espacio y tiene una forma circular simétrica gracias a la detención del crecimiento de sus ramas a partir de una distancia fija del centro de la mata.**

Europa a mediados del siglo XIX. A ellos siguió, rápidamente, el trabajo realizado en los Estados Unidos sobre partidas importadas de Europa. La intensidad de estos esfuerzos se incrementó gradualmente, a principios del siglo XX y, rápidamente, en los últimos cuarenta años. En este último período las producciones por hectárea se han incrementado de un modo espectacular (en más de cuatro veces para tomates enlatados procedentes de California, por ejemplo). Cada año se introducen por todo el mundo docenas de nuevas variedades domésticas.

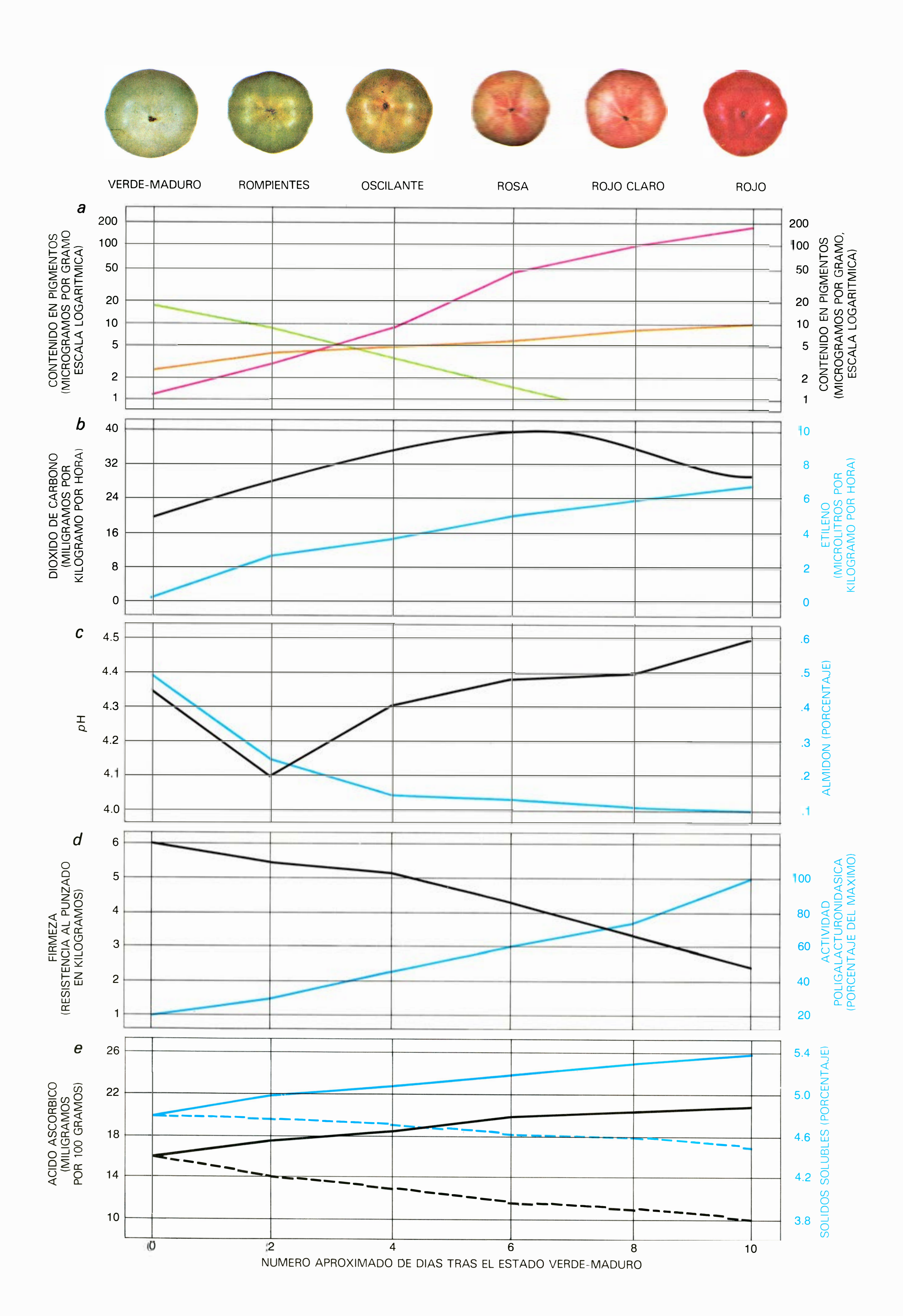
Mejora

La producción a gran escala de variedades domésticas híbridas del tomate es posible gracias a que las flores son de tamaño apropiado y de fácil manipulación para la polinización y porque la producción de semillas por flor polinizada es elevada. Los beneficios que se han conseguido a partir de estos cruzamientos son un incremento del vigor, una maduración más temprana y un desarrollo más rápido de las combinaciones de los caracteres deseados. Las variedades domésticas híbridas de la F_1 (primera generación filial) constituyen en la actualidad el 95 por ciento de las plantaciones de tomates comerciales en el Japón y el 50 por ciento en Israel. También constituyen un factor significativo en Europa Oriental y en otras partes. Hasta ahora, las variedades domésticas híbridas no han sido predominantes en los Estados Unidos, en parte porque la presión para aprovechar la tierra disponible al máximo es menor. Sin embargo, los híbridos son populares entre los jardineros aficionados, y superan a los cultivos comerciales en el condado de San Diego, en California. Su popularidad en el este de los Estados Unidos y en otras partes se va incrementando, así como el área dedicada a dicho cultivo. También está aumentando en otras regiones la extensión de tierra dejada a su plantación.

Una característica de la intensa actividad de mejora en los últimos 40 años ha sido la sustitución de genes mutantes en nuevas variedades domésticas. Uno de estos genes es el gen *u* (de maduración uniforme) que elimina las "manchas" verde-obscuras del fruto inmaduro y evita de este modo la inoportuna retención de clorofila en esta parte del fruto maduro. El gen *sp* (de "autopoda") determina en el vegetal un crecimiento ordenado, compacto y definido, en contraposición al crecimiento tendido, ilimitado e indeterminado que es el que suele darse. El gen *sp* apareció como mutación espontánea en 1914 en Florida, y se ha usado extensivamente en los programas de mejora del tomate. Las ramas de las plantas *sp* crecen todas hasta aproximadamente la misma distancia del centro de la planta y ésta florece más abundantemente que la de tipo normal (indeterminada). Como resultado, el agricultor obtiene plantas que facilitan la recolección, sobre todo la automatizada, y la floración se concentra en una época más corta.

Probablemente el avance moderno más espectacular ha sido el desarrollo de variedades domésticas adaptadas a la recolección mecánica. El trabajo fue iniciado en las décadas de los cincuenta y los sesenta por Gordie C. Hanna, de la Universidad de California en Davis. Logró concentrar en una sola variedad (VF 145) las características de planta pequeña y compacta, maduración concentrada, y frutos de tamaño y forma tales que pudieran ser recolectados mecánicamente, además de incorporar las características esenciales de resistencia a las enfermedades, producción y calidad. La VF 145 sigue siendo la variedad más extendida en California.

PROCESO DE MADURACION del tomate. Cada uno de los seis estadios está definido por una gama de color tipificada, publicada para el Departamento de Agricultura por la John Henry Company; los colores representados aquí son característicos de cada etapa. A medida que el contenido en clorofila *(verde)* **declina, aumentan el licopeno** *(rojo)* **y el beta-caroteno** *(anaranjado)* **(*a*). El etileno (que regula todo el proceso) es generado por el fruto, y la respiración (medida por desprendimiento de anhídrido carbónico) alcanza la cúspide (*b*). La acidez se incrementa brevemente y luego cae; desciende también el contenido de almidón (*c*). El incremento en el enzima poligalacturonidasa, que ataca a las pectinas, reblandece el fruto (*d*). En frutos madurados en la planta** *(líneas continuas)* **el contenido de ácido ascórbico (vitamina C) y sólidos solubles (principalmente azúcares) se incrementa; en frutos recolectados en el estadio verde-maduro y madurados por almacenamiento** *(líneas discontinuas),* **el contenido en azúcares y en vitamina C disminuye (*c*). (Datos suministrados por el prof. A. Kader de la Universidad de Davis.)**



VERDE-MADURO
ROMPIENTES
OSCILANTE
ROSA
ROJO CLARO
ROJO
a
CONTENIDO EN PIGMENTOS (MICROGRAMOS POR GRAMO ESCALA LOGARITMICA)
200
100
50
20
10
5
2
1
CONTENIDO EN PIGMENTOS (MICROGRAMOS POR GRAMO, ESCALA LOGARITMICA)
b
DIOXIDO DE CARBONO (MILIGRAMOS POR KILOGRAMO POR HORA)
40
32
24
16
8
0
ETILENO (MICROLITROS POR KILOGRAMO POR HORA)
10
8
6
4
2
0
c
pH
4.5
4.4
4.3
4.2
4.1
4.0
ALMIDON (PORCENTAJE)
.6
.5
.4
.3
.2
.1
d
FIRMEZA (RESISTENCIA AL PUNZADO EN KILOGRAMOS)
6
5
4
3
2
1
ACTIVIDAD POLIGALACTURONIDASICA (PORCENTAJE DEL MAXIMO)
100
80
60
40
20
e
ACIDO ASCORBICO (MILIGRAMOS POR 100 GRAMOS)
26
22
18
14
10
SOLIDOS SOLUBLES (PORCENTAJE)
5.4
5.0
4.6
4.2
3.8
0
2
4
6
8
10
NUMERO APROXIMADO DE DIAS TRAS EL ESTADO VERDE-MADURO

Por tratarse de tomates cultivados para mejora, los cambios no degradaron la calidad.

Un corolario indispensable de este logro fue el diseño de una máquina cosechadora por Coby Lorenzen, en Davis, en cooperación con la Blackwelder Company. Los esfuerzos imaginativos de estos investigadores y de los agricultores, que rápidamente se pasaron a la recolección mecánica, fueron el instrumento para preservar y extender la industria de la elaboración del tomate en California, donde el pasado año se practicó la cosecha mecánica en 113.000 hectáreas (279.223 acres).

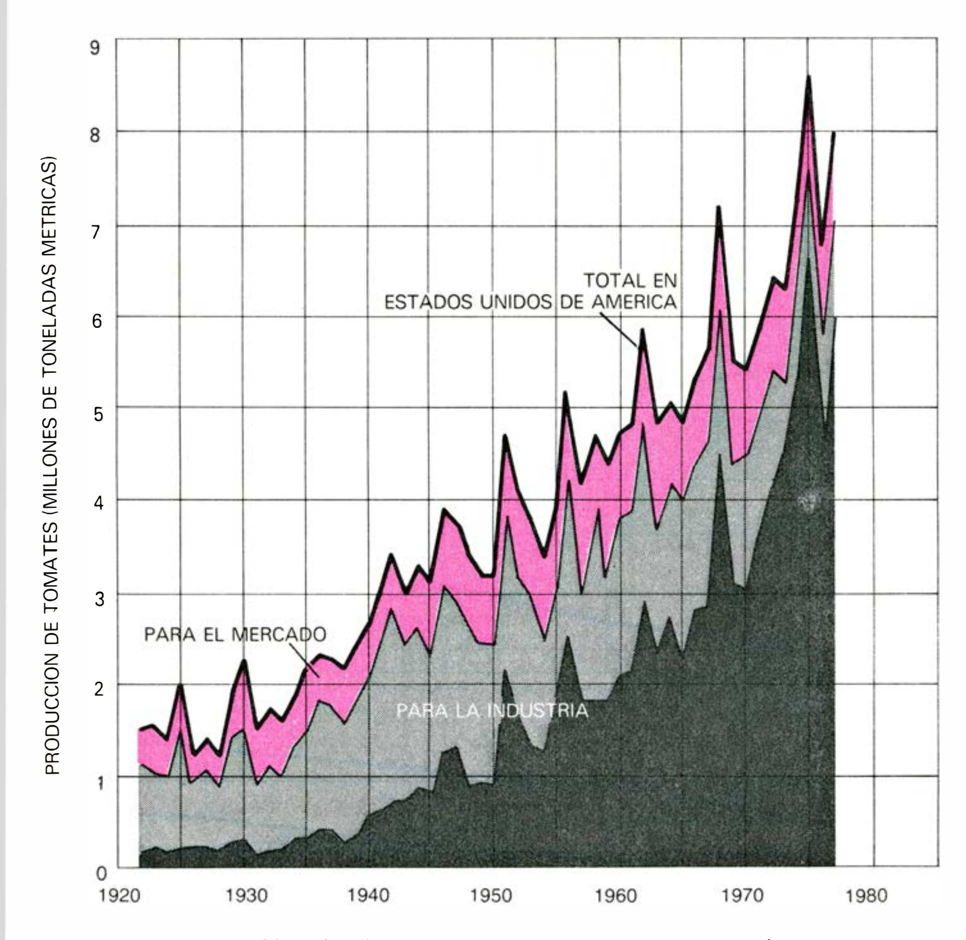
Los programas de mejora tienen como finalidad el incremento de la producción, y se extienden al color y sólidos solubles del fruto, posibilidad de automatización y otras características. Las variedades domésticas de forma poligonal (que aparece a la derecha de la fila superior de la portada de este número) están haciéndose más populares porque su fruto resiste la cosecha mecánica y la abscisión de la planta antes de la recolección.

Parte de la gran popularidad del tomate entre los jardineros aficionados se puede atribuir al hecho de su facilidad de cultivo. Crece en las más variadas latitudes, tipos de suelo, temperaturas y métodos agrícolas. Sin embargo, existen unos límites sobrepasados los cuales no se desarrolla. Los problemas más comunes son la falta de drenaje suficiente, luz inadecuada, temperaturas extremas y fertilización excesiva con nitrógeno cuando las condiciones son deficitarias.

Prácticas de cultivo

La necesidad de drenaje refleja probablemente la adaptación del tomate a los climas subdesérticos de su región originaria. La obtención de buenos frutos requiere generalmente medio día de sol por día. La disminución cuantitativa de la cosecha y la baja calidad de la misma puede derivarse de la sobrefertilización bajo condiciones deficitarias. En cuanto a la temperatura, la planta del tomate no soporta ni la congelación ni el frío prolongado a temperaturas por debajo de los 10 grados Celsius.

El método tradicional de iniciar el cultivo del tomate es por trasplante de plantas de semillero de uno o dos meses de edad. Este método está todavía generalizado y es fundamental donde la estación de crecimiento sea aún corta. Una tendencia



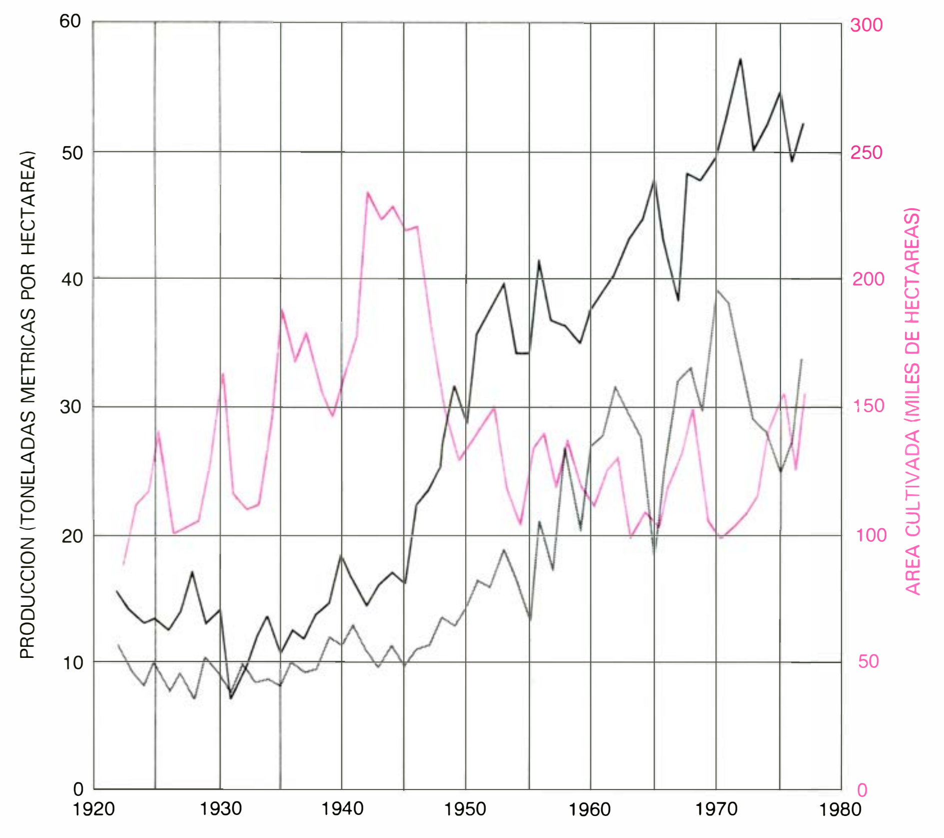
PRODUCCION DE TOMATES en los Estados Unidos. Ha aumentado firmemente (con fluctuaciones de corto plazo) desde 1922. La mayor parte del incremento se ha debido a las cosechas destinadas a la industria: enlatado, salsa, jugo, zumos, etcétera *(gris claro y gris obscuro)*. California ha contribuido en gran proporción al aumento de este cultivo *(gris obscuro)*. El mercado comercial de tomate fresco en los Estados Unidos ha permanecido prácticamente igual *(color)*. La exportación californiana se destaca con mucho.

reciente es sembrar las semillas directamente en el suelo, como se hace en los cultivos de cereales. Esta práctica requiere un cuidado especial en la preparación del suelo y en el control de malas hierbas una vez emergen las plántulas, pero es más económica y permite a la planta desarrollar un sistema radical que no queda dañado en absoluto por el trasplante. Como era de esperar, la siembra directa se ha constituído en parte integral de la producción de tomates recolectados mecánicamente.

La plasticidad del desarrollo de las plantas permite otros posibles métodos de propagación. Por ejemplo, los tomates pueden desarrollarse (pero sólo raramente) a partir de esquejes enraizados. Secciones de tallo con una hoja, al menos, pueden desarrollar raíces rápidamente si se cultivan en arena húmeda. Emergen entonces ramas a partir del tallo en la base de las hojas. El método no se puede utilizar con determinadas variedades domésticas (*sp*) porque las limitaciones en el crecimiento subsiguiente están predeterminadas en cada sección del tallo. Otro problema estriba en la dificultad de prevenir la aparición de ciertas enfermedades producidas por virus, que pueden ser transmitidas por prácticamente cualquier cosa que se ponga en contacto con la planta.

Como el injerto de las plantas de tomate es fácil, a veces se recurre a este método para combatir enfermedades edáficas que, de otro modo, serían de difícil control. Así, se emplean diversas especies de *Solanum* como portainjertos, dada su resistencia a las enfermedades de marchitez transmitidas vía suelo. Un híbrido interespecífico (*Lycopersicon esculentum* cruzado con *L. hirsutum*) sirvió de portainjertos para resistir ciertas enfermedades de la raíz en los invernaderos holandeses. En otra ocasión se utilizó el estramonio (*Datura stramonium*) como portainjertos para combatir enfermedades causadas por gusanos nemátodos. Se abandonó ese procedimiento porque los alcaloides tóxicos generados por el sistema radicular eran traslocados a los brotes del tomate. El injerto requiere mucho trabajo y tiene también las mismas limitaciones que la propagación por esquejes.

El modo como la planta echa las raíces puede afectar a los métodos de cultivo. Diversos estudios han demostrado que las raíces pueden profundizar hasta tres metros o más en suelos aluviales. Por ello, en los valles agrícolas de California y otras regiones, con suelo profundo y clima desértico, el tomate puede crecer con irrigación a intervalos de dos semanas o aún mayores. Todas las raíces absorben agua, en tanto que los minerales son absorbidos principalmente por las raíces de las capas más superficiales del suelo.



EL INCREMENTO DE PRODUCCION de los tomates para la industria es el resultado de la mejora del rendimiento. La extensión de tierras cultivadas para el procesado del tomate en los Estados Unidos ha disminuido desde 1940 *(curva coloreada)*. La producción ha aumentado drásticamente en California *(curva negra)* y menos en otros estados de la Confederación *(gris)*; aquélla cosecha actualmente 51,5 Tm/Ha.

Es práctica común apoyar la planta en una estaca o un enrejado a medida que va creciendo. El sistema tiene en su haber que favorece la limpieza y evita los ataques de los organismos de la podredumbre de los frutos, que podrían actuar si éstos tocaran el suelo húmedo. También se practica cuando el horticultor quiere obtener el máximo aprovechamiento del suelo, como en los invernaderos. El aumento del coste del trabajo y de los materiales ha limitado el tutorado en la producción comercial de tomates, y ha eliminado la producción comercial en las zonas donde el tomate no puede crecer sin tutorado.

Cuajado del fruto

El fracaso de la planta en el cuajado del fruto es el problema más común para los jardineros aficionados y los agricultores en áreas de producción marginal. Si el ambiente interno o externo no es favorable para el cuajado, las flores, una vez se han abierto, caen de la planta. Entre las causas más habituales de ello se cuenta la falta de polinización que se da frecuentemente en determinados ambientes; en invernaderos, por ejemplo, donde por otro lado las condiciones son favorables. Esta dificultad se corrige normalmente mediante métodos que hacen vibrar las flores, estimulando la liberación del polen. Otra solución prometedora consiste en seleccionar genotipos con una alta capacidad de autopolinización bajo condiciones ambientales determinadas.

Si el problema es la baja temperatura, la planta puede tratarse mediante rociado de las flores con ácido naftalenacético u otras sustancias que promuevan el crecimiento. Los frutos así cuajados, sin embargo, tienen pocas o ninguna semilla; en consecuencia tienden también a alcanzar tamaño, firmeza y color interno inferiores. Si el problema es la alta temperatura, podría ser una solución cultivar líneas que cuajen bien en estas condiciones. (Varias investigaciones han demostrado que plantas con capacidad hereditaria para cuajar los frutos a altas temperaturas también fructifican bien a bajas temperaturas.)

Otras condiciones pueden determinar la caída de las flores incluso cuando la polinización es adecuada: por ejemplo, luz insuficiente, sobrefertilización, una fructificación precoz y una temperatura diurna excesivamente alta. Si se somete la planta a temperaturas que repentinamente alcanzan los 42 grados Celsius o más, se producirá seguidamente una esterilidad que puede persistir durante una semana, cuando menos. Se ha observado que la producción de polen se reduce grandemente en ambientes muy cálidos, pero la incapacidad para el cuajado no puede ser corregida por la aplicación de polen viable. Sin lugar a dudas, la pérdida de flores a altas tempera-

turas es el resultado de efectos adversos en otras partes de la planta.

El fruto del tomate requiere de 40 a 60 días desde la floración para alcanzar la madurez completa. Una vez cuajado, el fruto se desarrolla rápidamente hasta su tamaño normal en cerca de la mitad de tiempo que su período de maduración. El tiempo restante transcurre en una serie de procesos de desarrollo que constituyen la maduración. El almidón se acumula en el fruto a partir de los azúcares elaborados previamente en él o en sus proximidades. A medida que va madurando la planta, la clorofila se degrada progresivamente, lo que ocasiona un blanqueamiento del fruto, que es un buen precursor de la madurez. A lo largo de la semana siguiente se desarrollará un intenso color rojo.

Durante esta transición, se destruye la clorofila que queda, se sintetizan carotenoides (sobre todo el licopeno rojo), decrece la acidez, el almidón se convierte en azúcares, se elaboran aceites esenciales y otros componentes del aroma, y los tejidos se reblandecen. También en este tiempo, aumenta drásticamente la tasa de respiración para luego declinar. El etileno sintetizado por el fruto induce una combustión súbita de la respiración y es responsable del desencadenamiento de toda la secuencia de acontecimientos.

El desarrollo más rápido de la semilla tiene lugar durante la segunda mitad del período de maduración. El embrión alcanza su tamaño definitivo dentro de su matriz de endosperma; los tegumentos seminales se desarrollan, endurecen y adquieren su característica cubierta de falsos pelos, que son los restos de las paredes exteriores de las células que se han suberificado, es decir, convertido en corcho por la infiltración de una sustancia llamada suberina. Cada semilla está envuelta en una vaina mucilaginosa. La germinación de las semillas dentro del fruto maduro, para lo cual las condiciones de temperatura y humedad serían ideales, está inhibida por el ácido abscísico y por sustancias no identificadas que normalmente se hallan presentes. Cuando las semillas son extraídas para sembrar, las sustancias inhibidoras y las vainas gelatinosas son eliminadas por un proceso de lavado o de fermentación. En la extracción comercial los frutos son desmenuzados, los fragmentos mayores cribados y, la masa fluida resultante, fermentada en cubas. Las semillas quedan entonces sumergidas en el fondo del líquido sobrenadante y el residuo es eliminado por flotación y criba.

Los tomates maduros son perecederos; en ese momento deben ser recolectados para así obtener una calidad óptima. Si han de transportarse a largas distancias, deben cosecharse cuando se tiñan de color verde-maduro o rosa. Pueden entonces madurar por sí solos o bien se puede lograr la maduración tratándolos con gas etileno, su sustancia natural inductora de la maduración. Se logra el mismo resultado tratando frutos inmaduros (en la planta o almacenados) con ethephon, un compuesto que genera etileno. El fruto que se cosecha en el estado verde-maduro tiende a perder azúcares y ácido ascórbico, lo que ocasiona en parte su inferior calidad respecto al tomate madurado en la mata.

La recolección del tomate

En casi todas partes los tomates se cosechan todavía a mano, pero hay una firme tendencia a una recolección mecanizada. Las máquinas más complejas (sobre todo en California, donde la cosecha destinada a la industria conservera se realiza mecánicamente) verifican todas las operaciones del proceso. La máquina es autopropulsada, corta la planta con una cuchilla que se desplaza ligeramente por debajo del nivel del suelo, levanta y sacude la planta hacia un sistema ascendente e inclinado de varillas horizontales que se mueven excéntricamente, deja caer las plantas y los residuos al suelo, desvía los frutos por unas correas móviles de lona a ambos lados de la máquina, donde se separan los tomates inmaduros o dañados y los terrones de tierra, y lleva los frutos clasificados a los contenedores. Estos son recipientes de fibra de vidrio (cuya capacidad oscila entre 9 y 11 toneladas métricas) o de madera contrachapada (capacidad desde 360 a 450 kilogramos) que se cargan en remolques.

En climas templados la recolección prosigue hasta que el frío la interrumpe. Cuando se aproxima el frío o las heladas, el agricultor puede recolectar tomates albiverdes o rosas y madurarlos lentamente a temperaturas entre 12 y 20 grados Celsius, consiguiendo así prolongar la producción más alta del período normal de cosecha. A veces se corta y almacena toda la planta; los tomates pueden madurar entonces incluso sin luz. Sin embargo, algunos de ellos pueden estropearse, y deben ser seleccionados con frecuencia para prevenir el desarrollo de organismos que causan la podredumbre.

Tanto el agricultor como el jardinero aficionado deben evitar el almacenamiento de los tomates a bajas temperaturas. La exposición prolongada a temperaturas entre 0 y 12 grados Celsius causa una lenta y progresiva destrucción de las células. El perjuicio aparece en forma de hundimientos y puntos necróticos que ofrecen una vía de penetración para diversos organis-

mos que causan la putrefacción. (El aroma se deteriora antes que aparezca la putrefacción, por lo que incluso una leve refrigeración puede reducir la calidad del fruto.) El daño por helada o frío intenso puede reconocerse por el aspecto obscuro y húmedo de los tomates afectados, que se reblandecen y deterioran en seguida.

A menudo, las plantas de tomate están tan disminuidas en sus reservas alimenticias en aras de una gran producción de frutos, que poco queda de ellas al final de la estación. La eliminación de los restos de la mata resulta bastante más sencilla que en la mayoría de los demás cultivos. Los desperdicios son mínimos y tienden a desintegrarse rápidamente. Su alto contenido en proteínas, sin embargo, ha estimulado las investigaciones en orden a la posibilidad de utilizar los residuos para alimento de ganado. Durante el gran aumento de producción de tomates en los últimos 50 años, California se ha puesto en cabeza. El último año dicho estado contribuyó con el 86 por ciento de los tomates de proceso industrial y el 76 por ciento de todos los tomates cultivados comercialmente en los Estados Unidos. Además, la exportación de California representa una parte sustancial del suministro mundial de tomates.

Como ya he indicado, la mayor parte del incremento ha sido en tomates para el procesado industrial. Los tomates frescos para el consumo han tenido una demanda estable, pero su incremento en la producción total ha sido mucho menor. Una parte creciente de este mercado ha sido abastecida con tomates importados fuera de estación desde las costas noroccidentales de México. No se puede dejar de mencionar el gran número de tomates producidos en los huertos domésticos a pesar de que no existen estadísticas fiables de estos cultivos. Según encuestas recientes, el tomate es el vegetal más popular entre las plantaciones caseras.

Quizás el fenómeno más notable del gran aumento en la producción comercial de tomates sea que haya ido acompañado de una disminución en la extensión de tierras dedicadas a su cultivo. La causa es la mejora en los rendimientos por hectárea. Las producciones, hace 40 a 50 años, eran, en promedio, de unas 13,5 toneladas métricas por hectárea en California y de unas 10 toneladas métricas en otros estados de la Confederación. En la actualidad son, respectivamente, de 51,5 y 33,5 toneladas. Este ejemplo de aumento de productividad sólo ha sido igualado por pocos cultivos en los Estados Unidos. Es un tributo rendido a la investigación que introdujo nuevas variedades y a los investigadores y agricultores cuyo ingenio ha mejorado los métodos de producción.

Colisiones de hadrones a muy alta energía

Las secciones eficaces de hadrones a muy altas energías poseen un carácter crítico similar a las transiciones de fase de segundo orden, que puede estudiarse con independencia de los detalles de la cromodinámica cuántica que lo sustenta

Carlos Pajares y Ramón Pascual

Para estudiar cualquier sistema debemos medir sus características, es decir, sus magnitudes físicas, lo que en general exige introducir en sus proximidades o en el interior del sistema unas sondas sensibles que nos permitan determinar los valores que toman estas magnitudes. Así, por ejemplo, para conocer la temperatura de un fluido precisamos introducir un termómetro en su interior; para conocer el campo eléctrico creado por cierta distribución de cargas, debemos situar una carga eléctrica muy pequeña en sus proximidades y medir las fuerzas que actúan sobre ella.

En el caso en que nosotros estemos interesados en conocer las características de un sistema atómico o subatómico deberemos estudiar análogamente su entorno mediante los efectos que el sistema produce sobre otro sistema, a poder ser de características conocidas. Es decir, lo que debemos hacer será lanzar esas sondas o partículas simples contra el sistema a estudiar y analizar el efecto que el sistema produce en las sondas: un cambio en sus características (colisión inelástica) o una variación de su energía o/y momento (colisión elástica). Démonos cuenta de que la más simple de las medidas, el mero hecho de observar, precisa lanzar contra el objeto de nuestra observación una sonda, la luz, es decir, un haz de fotones, y analizar las reflexiones o transmisiones de la luz en el objeto para las distintas longitudes de onda, con lo cual conoceremos el grado de transparencia del objeto, su forma, su color, etcétera.

La acción que el sistema que se observa (que suele estar en reposo y al que se suele llamar blanco) produce sobre la sonda (que suele lanzarse contra el blanco a una determinada velocidad y a la que llamamos proyectil) se expresa de una forma cuantitativa mediante la llamada sección eficaz de colisión. La sección eficaz da idea de la sección transversal que el blanco ofrece al proyectil. Verbigracia, si lanzamos un haz de luz contra un objeto a fin de ver sus características, el análisis de cómo la luz es reflejada, absorbida, difractada, etcétera, por el blanco nos da toda la información deseada, información que puede condensarse en la sección eficaz.

La sección eficaz diferencial se define como la razón entre el número de partículas del haz que son desviadas en una dirección determinada y el flujo del haz, todo ello por unidad de tiempo y de superficie. La suma (o integral) de las secciones eficaces diferenciales en todas las direcciones nos da la sección eficaz total elástica. En el caso particular de sistemas subatómicos, en los que estaremos interesados, las características de los mismos pueden provocar en el proceso de colisión una modificación sustancial de los mismos, en cuyo caso suele hablarse de colisión inelástica. La suma de la sección eficaz elástica y de las secciones eficaces en cada uno de los canales inelásticos se llama sección eficaz total.

La sección eficaz, como toda sección, tiene unidades de superficie; en el caso de sistemas subatómicos, la unidad apropiada es el barn, igual a 10^{-24} centímetros cuadrados, o la milésima parte del barn, el milibarn. Así, por ejemplo, si el núcleo de un átomo pudiera considerarse como una partícula clásica esférica de radio 10^{-12} centímetros, su sección eficaz sería de 3,14 barn.

Los descubrimientos fundamentales del microcosmos han sido siempre resultados más o menos directos de experimentos de colisión. A principios de siglo, exactamente en 1909, Geiger y Marsden lanzaron un haz de partículas alfa provenientes de una fuente radiactiva natural sobre láminas de oro muy delgadas, experimento que sirvió para desterrar el modelo atómico de Thomson consistente en imaginar al átomo como una carga positiva de 10^{-8} cm de radio, en cuyo interior estaban sumergidos los electrones. Este modelo, de gran aceptación en los primeros años del siglo, resultaba incompatible con el número relativamente alto de partículas alfa que eran desviadas a grandes ángulos. La interpretación de los resultados experimentales de la colisión condujo a Rutherford a elaborar su modelo atómico basado en un núcleo positivo y pesado, de unos 10^{-13} cm de radio, rodeado de unos electrones periféricos situados a distancias del orden de 10^{-8} cm. El modelo de Rutherford, aunque modificado de manera esencial por los postulados cuánticos de Bohr, y posteriormente de manera más consistente, por la mecánica cuántica, se halla hoy firmemente establecido.

Como otro ejemplo, citemos los experimentos de colisión elástica de electrones sobre núcleos realizados en el Stanford Linear Accelerator Centre (SLAC) bajo la dirección de H. H. Hofstadter, que marcaron un hito en el análisis de la estructura nuclear. En ellos se usaban haces de electrones acelerados a alta energía. La elección de electrones como proyectiles se debía a que los electrones son partículas sin estructura, no sensibles a las fuerzas nucleares, y cuyas características se conocen mediante la electrodinámica cuántica. Al ser de gran energía, los electrones tienen una longitud de onda asociada muy pequeña (la constante de Planck dividida por el momento lineal) y permiten analizar con gran poder resolutivo las características de los núcleos.

Como último ejemplo de la importancia de los experimentos de colisión citemos los recientes experimentos que, usando partículas sin estructura y de interacciones relativamente conocidas como son los electrones y neutrinos como proyectiles, han permitido sentar las bases de los actuales modelos de partones o quarks (INVESTIGACION Y CIENCIA, enero de 1977). Estudiando colisiones inelásticas

de estos proyectiles sobre protones, se observa que los datos experimentales presentan una característica peculiar: en vez de ser función de las dos variables cinemáticas independientes, dependen tan sólo del cociente de las mismas. Esta propiedad de escala parece apuntar claramente a modelos de protones no elementales sino formados por un cierto número de constituyentes, aparentemente sin estructura, a los que Feynman llamó partones y que pueden ser equivalentes a los quarks de Gell-Mann y Zweig.

Los sistemas subatómicos suelen clasificarse según las interacciones o fuerzas a las que son sensibles. Las dos grandes familias son los leptones (etimológicamente, partículas ligeras) entre los que se encuentran el electrón, el muon, los neutrinos y el leptón pesado y sus antipartículas, que son insensibles a la fuerza fuerte, y los hadrones (etimológicamente, partículas pesadas) como el protón, el neutrón, los piones y los kaones, sensibles a todas las interacciones, siendo la nuclear o fuerte la dominante. Forman familias aparte el fotón o cuanto del campo electromagnético y el gravitón o cuanto del campo gravitatorio.

Los fotones y los leptones se han considerado como sistemas relativamente bien conocidos; sin entrar en problemas de fondo, los físicos sabían cómo predecir los resultados de los experimentos con ellos realizados. Ultimamente incluso se dispone de una teoría unificada para todos ellos (INVESTIGACION Y CIENCIA, marzo, abril y mayo de 1978), que está de acuerdo con la casi totalidad de los datos experimentales.

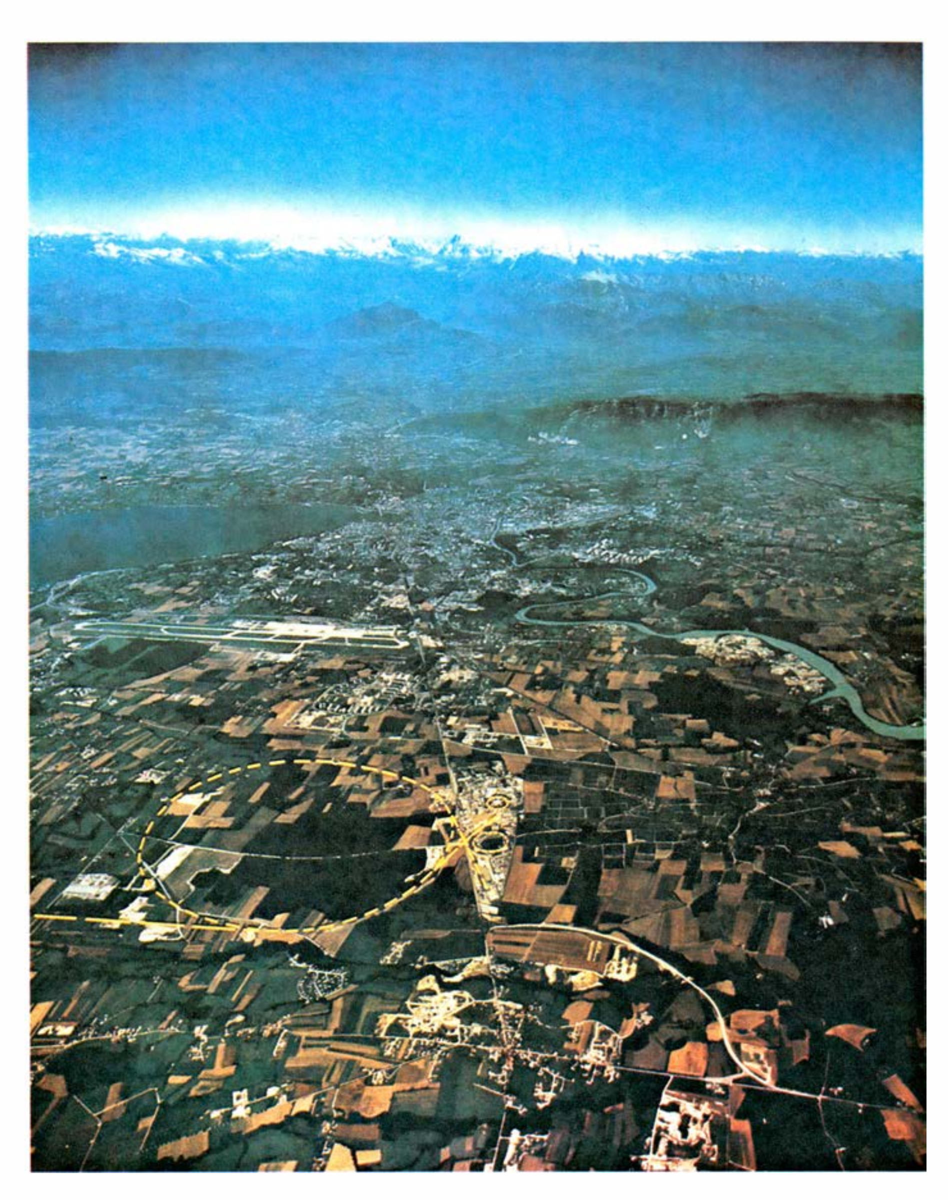
El problema es muy distinto para los hadrones, partículas que interaccionan fuertemente, para los cuales no ha habido más que teorías básicas, pero poco cercanas a los hadrones reales y, por tanto, con escaso poder predictivo, o bien teorías más o menos fenomenológicas de éxito relativo. El número cada vez mayor de hadrones existentes y algunos hechos experimentales como los antes mencionados han conducido a los físicos a olvidarse del posible carácter elemental de los hadrones y a pensar en ellos como agregados de otros entes elementales, los quarks o partones; se trataría entonces de buscar una teoría para tales entes elementales.

Como por el momento no disponemos de una solución del más firme candidato a una tal teoría, la cromodinámica cuántica, en lo que sigue intentaremos mostrar una teoría fenomenológica que permita hacer predicciones con independencia de los detalles que esa teoría, u otra futura, pudiera tener.

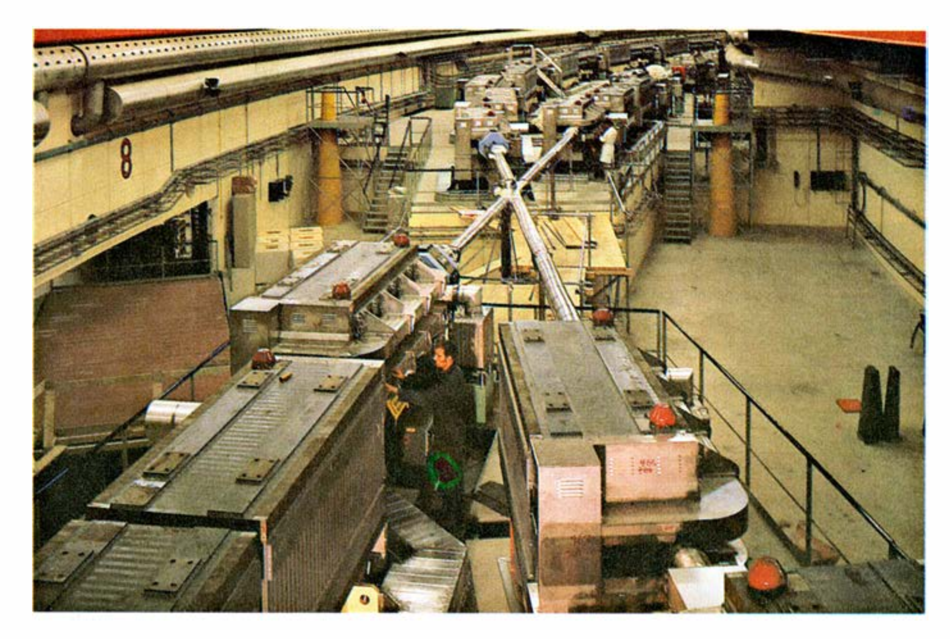
La base experimental de toda la física de hadrones reside en experimentos de colisión leptón-hadrón o hadrón-hadrón. Estos últimos serán el objeto de este trabajo. Tales experimentos se realizan siempre lanzando un haz de hadrones sobre un blanco, que suele ser de protones. De hecho, los aceleradores de partículas sólo pueden acelerar partículas estables, y el único hadrón estable es el protón (y el antiprotón). A partir de los haces de protones energéticos se puede obtener, mediante choques de protones sobre núcleos, haces de otros hadrones, como piones o kaones de muy alta energía.

Actualmente se dispone de grandes aceleradores de protones; los mayores son los de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), de Ginebra, y el del Fermi National Accelerator Laboratory, en Estados Unidos. Están capacitados para acelerar protones hasta momentos del orden de 400 GeV/c (1 GeV = 10^9 electronvolt, c la velocidad de la luz), es decir, hasta una energía tal que la velocidad de los protones es de 0,9999994 veces la velocidad de la luz. En tamaño decreciente les sigue el acelerador de Sherpukov en la Unión Soviética, que acelera protones hasta 70 GeV/c, y los de la generación anterior existentes en Europa, Unión Soviética y Estados Unidos, que aceleran protones hasta alguna decena de GeV/c.

Aparte de estos aceleradores, que podríamos llamar convencionales, existen los llamados anillos de almacenamiento, que son máquinas que aumentan enorme-



VISTA AEREA DEL CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear). El CERN es un centro formado por todos los países de Europa Occidental (excepto España, Portugal, y Finlandia) para investigar las propiedades últimas de los núcleos. Consta de un sincrotón de protones, capaz de acelerarlos a momentos de 25 GeV/c (el menor de los anillos). A su vez, éste alimenta unos anillos de almacenamiento de protones donde se producen choques de protones, que se mueven en direcciones opuestas (*anillo pequeño inferior*), y un supersincrotón de protones, puesto en marcha recientemente. Este último acelerador es subterráneo y su trayecto se representa por el gran anillo. Como escala de tamaños puede compararse con la ciudad de Ginebra y el lago Leman situado a una decena de kilómetros. (Fotografía cedida por el CERN.)



EN EL ANILLO DE ALMACENAMIENTO de protones del CERN, los protones de momento 25 GeV/*c* que se mueven en una dirección chocan contra otros que se mueven en dirección opuesta, en zonas como la mostrada arriba. Los protones provenientes del sincrotón de protones se inyectan en pulsos o paquetes en dos anillos excéntricos recorridos en direcciones opuestas. En las zonas de intersección de los anillos se producen choques casi frontales a una energía mucho mayor que la alcanzada en los choques contra blancos fijos.

mente la energía de la colisión haciendo chocar el proyectil, no contra un blanco fijo, sino contra otro proyectil que se mueve con momento opuesto. Así, por ejemplo, la energía en el centro de masa de la reacción protón de 25 GeV/*c* contra protón en reposo será de unos 7 GeV, mientras que el choque contra otro protón, que se mueva con momento opuesto, será del orden de 50 GeV. El único anillo de almacenamiento de protones existente es el del CERN, si bien está ya en fase de construcción en Estados Unidos el ISABELLE, de energía mucho mayor. El inconveniente de los anillos de almacenamiento reside en que no pueden operar con haces de hadrones secundarios como piones o kaones.

La sección eficaz protón-protón se ha ido estudiando desde los tiempos de los primeros aceleradores a fin de comprender las características de las fuerzas nucleares. A medida que se construyeron aceleradores de más energía se fueron descubriendo otros hadrones y se fueron analizando también las secciones eficaces pion-protón y kaón-protón a energías cada vez más altas. Hace ya más de 20 años que se observó que la sección eficaz total dependía de la energía del proyectil y, en particular, que la sección eficaz total πp crecía muchísimo para piones de energía cinética de unos centenares de megaelectronvolts (MeV) para decrecer de nuevo y presentar a energías mayores un comportamiento irregular.

Esta dependencia de la sección eficaz total πp con la energía llevó a la conclusión de que, a unas ciertas energías, se formaba un estado resonante del sistema πp que se desintegraba en seguida en un pion y un protón. La formación de estos estados resonantes era lo que producía la presencia de picos en la sección eficaz, picos que se sobreponían a un fondo no resonante. El análisis detallado del primero de estos picos mostró que la resonancia existía tanto para piones positivos como negativos, es decir, podía tener carga nula ($\pi^- p$) o igual a dos veces la carga del protón ($\pi^+ p$), y debía tener spin 3/2 (en unidades de la constante de Plank dividida por 2π). La masa de la resonancia no estaba bien definida, pues el pico, aunque centrado en 1236 MeV (medimos la masa como la energía equivalente a ella), tenía una gran anchura, unos 110 MeV. Esta indeterminación de la masa era consecuencia de la corta vida media de la resonancia; en efecto, de acuerdo con la relación de incertidumbre de Heisenberg, la indeterminación en la masa es del orden de la constante de Plank dividida por la vida media, que, al ser tan pequeña en este caso, daba una incertidumbre importante.

Los picos menos elevados que aparecen a energías cinéticas mayores son debidas también a otras tantas resonancias que fueron analizándose tanto teórica como experimentalmente, de manera que hoy día disponemos de una veintena de resonancias distintas en el sistema pion-nucleón, en el intervalo de masas comprendido entre 1230 y 3230 MeV.

Cuando se descubrieron las partículas extrañas en los procesos de producción asociada, en que $\pi^- p$ daba un par de partículas extrañas, $K^- \Lambda$, pronto se pudo disponer también de haces de kaones negativos, con lo cual se analizó la variación de la sección eficaz $K^- p$ con la energía, encontrándose que presentaba también unos picos típicos del comportamiento resonante. Algo más tarde, se dispuso de haces de K^+ y se comprobó que, sorprendentemente, el sistema $K^+ p$ no presentaba estructuras resonantes, sino sólo un



SUPERSINCROTRON DE PROTONES (SPS) del CERN. El túnel (circular) del acelerador tiene una longitud de 5200 metros y está excavado bajo tierra a una profundidad media de 40 metros, en la zona fronteriza entre Francia y Suiza. Los protones inyectados desde el sincrotrón PS de momento 25 GeV/*c* son acelerados mediante los imanes situados a lo largo del recorrido, hasta un momento de 500 GeV/*c*. Recientemente se ha aprobado y puesto en marcha el proyecto de construcción de un sistema que permitirá acelerar en el mismo aparato a un haz antiprotones, que circulará a su vez y en dirección opuesta (debido a la carga negativa de los antiprotones), y hacer choques frontales protón antiprotón a energía elevadísima.

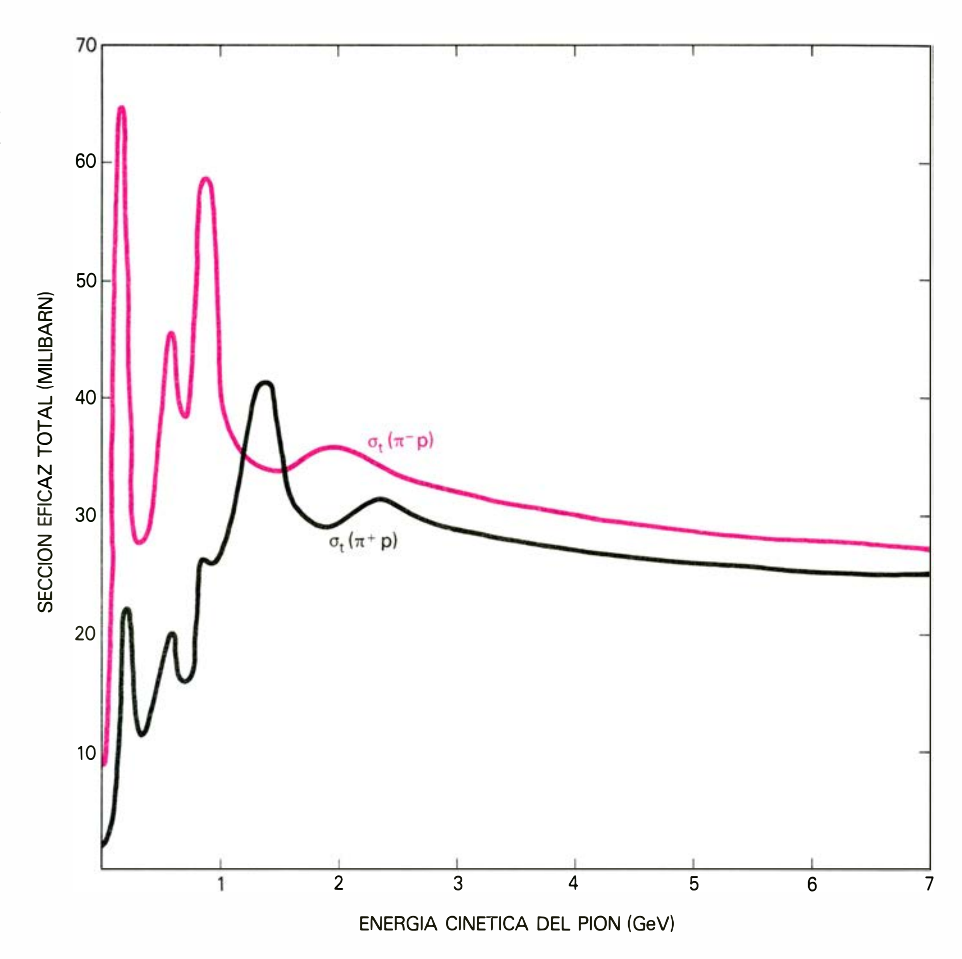
fondo no resonante, como sucedía en las colisiones protón-protón.

Al ponerse en marcha, hacia los años 50, los aceleradores de protones de 10 a 20 GeV, se observó que los picos resonantes tendían a suavizarse hasta desaparecer para momentos incidentes de unos 4 o 5 GeV/*c*. En el caso de $\pi^- p$ y $\pi^+ p$ parecía además que ambas secciones eficaces tendían a igualarse a un valor constante. Asimismo, en el sistema $K^- p$, al desaparecer las resonancias, la sección eficaz tendía suavemente al valor constante de la sección eficaz $K^+ p$, y la sección eficaz antiprotón-protón tendía a igualarse a la de protón-protón.

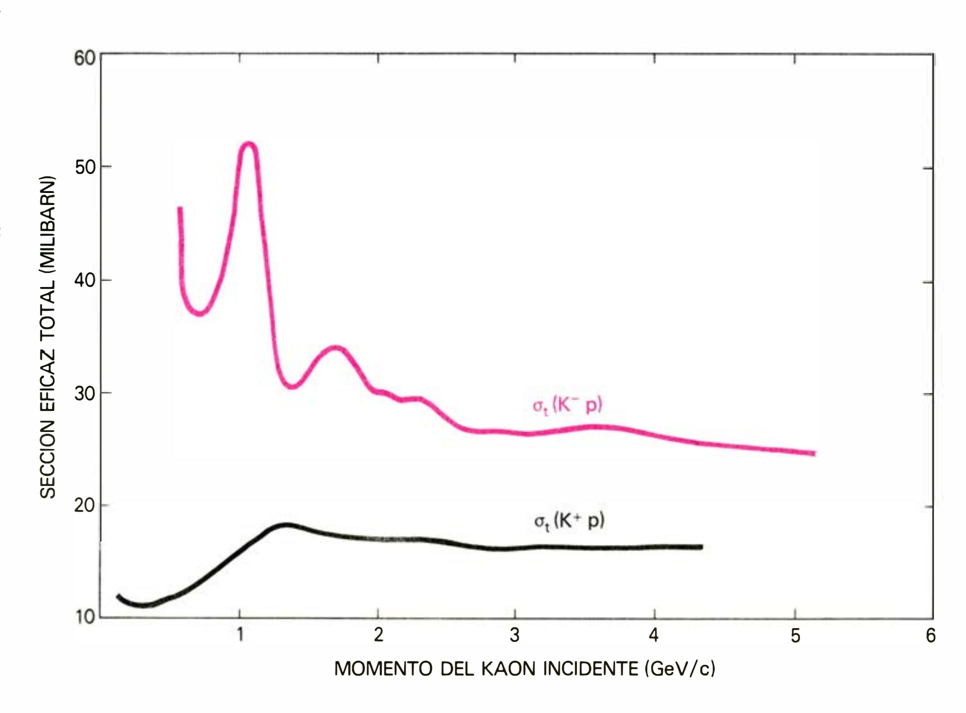
Este comportamiento era perfectamente compatible con las teorías existentes. Partiendo de hipótesis muy generales, se había demostrado en 1958 el teorema de Pomeranchuck, que afirmaba que la diferencia entre las secciones eficaces totales de una partícula y de su antipartícula sobre un blanco dado debían tender a cero para grandes energías. En el caso de que las secciones eficaces tendieran a un valor constante, esta constante debía ser la misma para partícula y antipartícula.

Sin embargo, la puesta en marcha del acelerador de protones de 70 GeV/*c* de Sherpukov, en la Unión Soviética, permitió, hacia final de la década de los sesenta, observar claramente que, a estas energías, las secciones eficaces comenzaban a crecer aunque de forma muy lenta. La reciente puesta en marcha de los aceleradores del Fermilab y del CERN, junto con determinaciones precisas de la sección eficaz *pp* a las energías de los anillos de almacenamiento del CERN, han puesto de manifiesto de manera inequívoca el crecimiento de la sección eficaz con la energía. Este crecimiento, muy lento, no es incompatible con un crecimiento del tipo logaritmo al cuadrado de la energía en centro de masas al cuadrado expresada en GeV^2 ($\log^2 s$). Tal crecimiento sería el máximo que podía presentarse sin poner en entredicho las más firmes bases de la física de partículas elementales: la cota de Froissart asegura, a partir de principios muy generales, que la sección eficaz total no puede crecer más de prisa que $\log^2 s$.

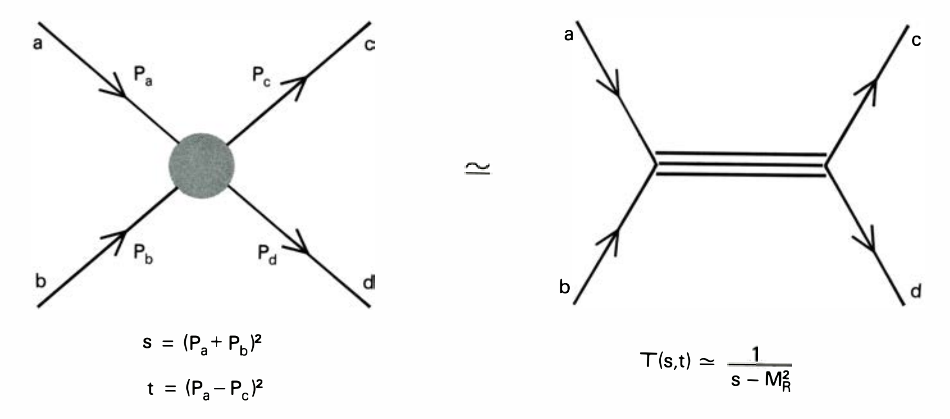
¿Cómo se explican teóricamente estos comportamientos con la energía de las secciones eficaces? Como ya hemos dicho, desde 1960 la existencia de los picos se interpretaba como la producción de estados resonantes de cortísima vida media (10^{-22} segundos), de manera que cuando no existían estados resonantes ($K^+ p$, *pp*) la sección eficaz tenía un comportamiento suave. Estos mecanismos se conocen como producción de resonancias en el canal *s* o canal directo.



VARIACION DE LA SECCION EFICAZ total pion-protón en función de la energía del pion incidente. A energías bajas aparecen tanto en el caso de π^+ como de π^- (pion negativo) grandes variaciones de la sección eficaz debidas a la existencia de resonancias. A medida que la energía (gigaelectronvolts) aumenta desaparecen los efectos resonantes y parece que ambas secciones eficaces tienden a un mismo valor constante.



VARIACION DE LA SECCION EFICAZ total kaón-nucleón con la energía. De la misma manera que en el caso de piones para la reacción $K^- p$ se presenta un comportamiento resonante, debido a la aparición de las resonancias extrañas. En la reacción $K^+ p$ no se presenta un tal comportamiento, alcanzándose muy pronto un comportamiento estacionario de la sección eficaz total. Tal canal, llamado exótico, tiene unos números cuánticos que no permiten en ninguno de los casos la formación de los estados resonantes habituales.



CUANDO CHOCAN DOS PARTICULAS, *a* y *b*, produciendo dos partículas *c* y *d*, las características del choque se describen por una función de las variables *s* y *t*, llamada amplitud de colisión T *(s,t)*. En la zona de las resonancias se supone que tal amplitud se debe, principalmente, a que las partículas *a* y *b* forman un estado ligado o resonante inestable, de masa M_R, que, a su vez, se desintegra también en las partículas *c* y *d*.

La nomenclatura proviene de que, cuando se estudia la reacción $a + b \rightarrow c + d$ disponemos de dos variables cinemáticas independientes, por ejemplo, el momento del proyectil y el ángulo de colisión o ángulo de desviación que sufre el proyectil. En vez de estas dos, suelen usarse la ya mencionada variable *s* y la variable *t*, definida como el cuadrado de la diferencia de los cuadrimomentos de las partículas *a* y *c*, ligada estrechamente al ángulo de colisión. De esta manera, la amplitud de colisión, cuyo módulo al cuadrado es proporcional a la sección eficaz diferencial, es una función de las dos variables *s* y *t*, que corresponde a la reacción $a + b \rightarrow c + d$ cuando *s* es positiva y mayor que un cierto umbral y *t* es negativo y menor que un cierto valor.

Algunos modelos, así como algunas teorías axiomáticas, inducen a pensar que la misma función de *s* y de *t* para *s* negativo y *t* positivo describe el proceso $a + \overline{c} \rightarrow \overline{b} + d$ (siendo la barra la indicación de antipartícula). Esta hipótesis se llama hipótesis de cruce, y hasta el momento no es incompatible con los hechos experimentales. A la reacción $a + b \rightarrow c + d$ se le llama canal directo y a la $a + \overline{c} \rightarrow \overline{b} + d$, canal *t* o canal cruzado.

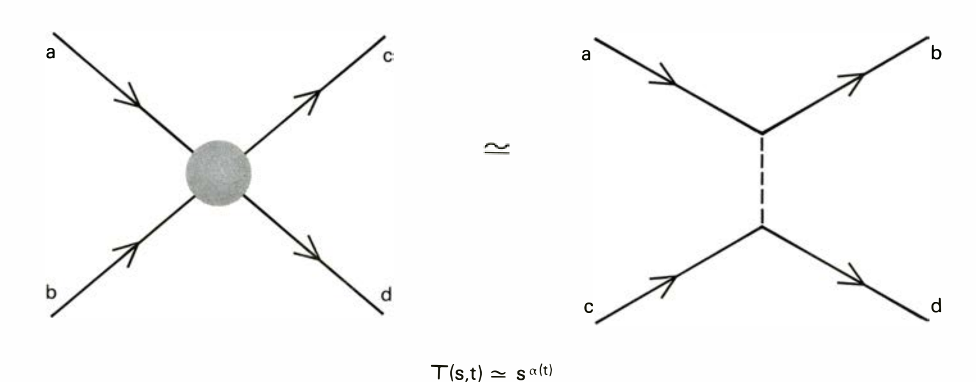
Para momentos del proyectil mayores que algunos GeV/*c*, la idea de producción de resonancias en el canal *s* no permitía explicar los datos experimentales y era necesario buscar otros mecanismos. En los primeros años sesenta se inició un intento que extrapolaba a la física (relativista) de los hadrones, algunos métodos usados en las teorías de colisiones de partículas por centros de potencial. La resolución de la ecuación de Schrödinger (no relativista) de una partícula en un potencial podía estudiarse analizando sus soluciones en términos de ondas parciales, es decir, descomponiendo la solución en suma de componentes de momento angular bien definido. Un método de tratar la ecuación consistía en extender las soluciones a valores complejos (no físicos) del momento angular; la complicación que se obtenía a primera vista se compensaba con la potencia de los métodos de análisis complejo. De esta manera, las amplitudes de colisión eran funciones definidas en el plano complejo del momento angular cuyas únicas singularidades eran polos simples cuya posición variaba con la energía del proyectil.

Estos polos, llamados de Regge, fueron extrapolados como las únicas singularidades que presentarían también las amplitudes de colisión de las partículas elementales. La posición de dichos polos depende de la variable *t*; cuando *t* varía, la posición describe una línea llamada trayectoria de Regge, que indicaremos por α *(t)*. Para $t < o$, es decir, para los valores físicos de *t* en el canal directo, los polos de Regge contribuyen a la amplitud como $s^{\alpha(t)}$. Para $t > o$, cuando $\alpha(t)$ pasa por un valor entero o semientero, determina la existencia de una partícula o resonancia de masa al cuadrado igual al valor de *t* correspondiente y de spin igual al valor de la parte real de α. De esta manera, sobre una trayectoria de Regge se acumulan familias de partículas de distinta masa y spin, pero que tienen los otros números cuánticos iguales. Toda esta trayectoria, llamada Reggeon, contribuye a la sección eficaz en la forma $s^{\alpha(t)}$.

Debido a que la sección eficaz no puede crecer más que como $\log^2 s$, para $t \leq o$ forzosamente debemos tener $\alpha(t) < 1$, ya que la sección eficaz total, debido a las relaciones de unitariedad que veremos, es proporcional a la amplitud dividida por *s*. La comparación de estas ideas con los hechos experimentales muestra que las trayectorias de Regge son lineales, $\alpha(t) = \alpha(o) + \alpha' t$, y que en general tienen todas una misma pendiente, del orden de 1GeV^{-2}. Las partículas elementales existentes pueden clasificarse así sobre trayectorias de Regge paralelas en el plano momento angular-masa al cuadrado, formando un diagrama de Chew-Frautschi.

De esta manera los polos de Regge determinaban, por un lado, la existencia de familias enteras de partículas y resonancias, en buen acuerdo con los hechos experimentales y, por otro, permitían conocer la parte dominante, para energías altas, de la amplitud de colisión para valores pequeños de módulo de *t*, y, por tanto, determinar el comportamiento de la sección eficaz para ángulos de colisión pequeños. Según fuesen los números cuánticos del proyectil y del blanco, se obtenían las trayectorias que podían intercambiarse entre ellas y se determinaba la forma de la sección eficaz.

El decrecimiento que mostraban las secciones eficaces para momentos de 5-10 GeV/*c* se explicaba así suponiendo trayectorias de Regge ordinarias de $\alpha(o) < 1$. Sin embargo, para explicar el comportamiento de las secciones eficaces para momentos mayores, es decir, la aparente tendencia a valores constantes, se debía introducir otra trayectoria peculiar llamada de vacío o de Pomeranchuck, o brevemente pomeron, tal que tuviese pendiente mucho



EN LA ZONA DE ENERGIAS de colisión elevadas, y para valores de *t* pequeños, la teoría de polos de Regge supone que la amplitud de colisión se debe esencialmente al intercambio entre las partículas *a* y *b* de una trayectoria de Regge. Según sean los números cuánticos de ésta, las partículas *a* y *b* cambiarán o no de naturaleza, convirtiéndose en *c* y *d*. Para energías muy elevadas domina únicamente la trayectoria del pomeron, de manera que se predice un comportamiento acorde con el teorema de Pomeranchuck.

menor con lo cual dominaría sobre las otras a alta energía, produciendo unas secciones eficaces totales constantes. Esta trayectoria sobre la que no había ninguna partícula física conocida sólo podría albergar sistemas que tuviesen los números cuánticos del sistema vacío. El ajuste a los datos experimentales sugería $\alpha_P(o) \simeq 1$ y $\alpha' \simeq 0{,}3\ \text{GeV}^{-2}$.

Mediante la introducción del pomeron, además de explicarse la constancia de las secciones eficaces totales en las que era posible intercambiar esta trayectoria del vacío, se obtenía una clara satisfacción del teorema de Pomeranchuck, pues a altas energías sólo sobrevive la trayectoria del pomeron cuya contribución es la misma para partícula y antipartícula.

Por otro lado, la introducción de la trayectoria de Pomeranchuck tenía un significado físico interesante a través de las relaciones de unitariedad. La unitariedad expresa el simple hecho de que la parte imaginaria de la amplitud de colisión $a + b—c + d$ es igual a la suma de la amplitud de $a + b—n$ por la amplitud $n—c + d$, siendo n cualquier estado intermedio accesible de cualquier número de partículas. En el caso de colisiones elásticas, la unitariedad relaciona la parte imaginaria de la amplitud con el módulo al cuadrado de la amplitud del estado inicial yendo a cualquier estado final, es decir, relaciona los procesos elásticos con los inelásticos. La relación de unitariedad es uno de los pilares básicos en que se apoya la física de las partículas elementales, y se basa tanto en consideraciones teóricas como en hechos experimentales.

A alta energía sólo permanece en la amplitud elástica de trayectoria del pomeron. Podemos afirmar, vía relación de unitariedad, que el pomeron es el efecto que todos los procesos de producción de partículas a alta energía producen sobre el canal elástico. Dicho de otra manera, el pomeron no se debe al intercambio de Reggeones, sino a la existencia de procesos inelásticos de producción de partículas. De esta manera, el pomeron aparece con un papel singularizado respecto a todos los demás Reggeones.

Si añadimos a esas consideraciones las ideas del modelo de quarks de Gell-Mann y Zweig sobre la estructura interna de los hadrones, las secciones eficaces de los distintos hadrones podrán relacionarse entre sí fácilmente, obteniéndose ciertas relaciones que están de acuerdo con los hechos experimentales. Así, por ejemplo, al estar formados los piones por dos quarks y los nucleones por tres, la razón de la sección eficaz πp a pp deberá ser de 2/3, valor próximo al experimental. El modelo de quarks proporcionaba también una clave sencilla para explicar la ausencia de resonancias en algunos canales, de manera que en ellos la sección eficaz fuese constante desde energías bajas, en que para otros procesos todavía hay efectos resonantes. En tales canales, como K^+p o pp no podía existir ningún estado resonante formado por tres quarks, sino que los posibles estados deberían tener una composición de quarks distinta; serían estados llamados exóticos, cuya prueba experimental es por el momento nula o muy problemática.

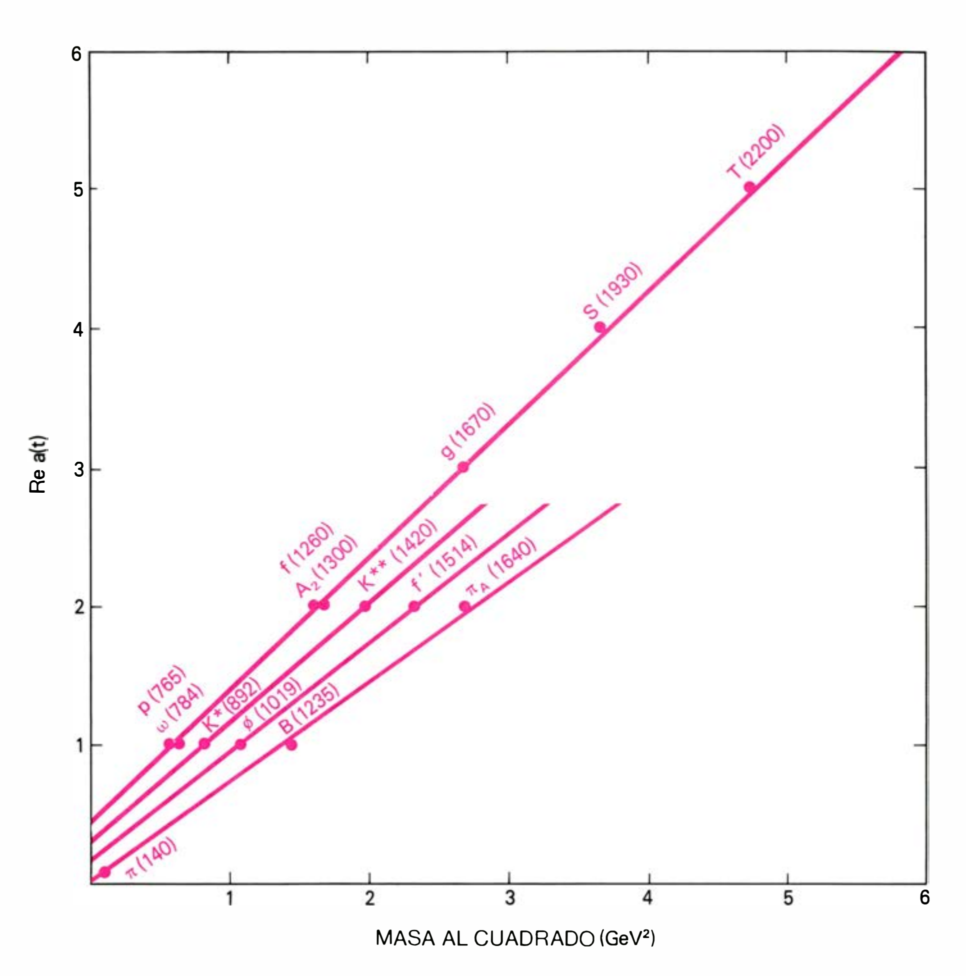


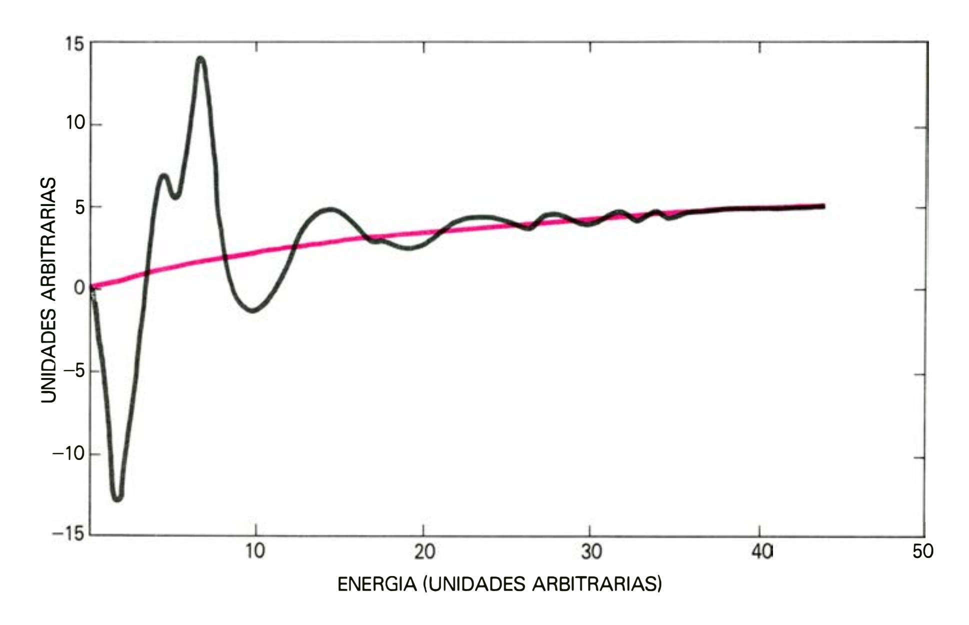
DIAGRAMA DE CHEW-FRAUTSCHI de las trayectorias de Regge. Sobre cada trayectoria, cuando su parte real pasa por un valor entero o semientero, la teoría predice la existencia de una partícula o resonancia cuya masa al cuadrado (en gigaelectronvolts) toma el correspondiente valor de la abscisa. Todos los mesones (spin entero) indicados han sido observados. Para los bariones (spin semientero) existe un diagrama igual.

De esta manera logramos explicar hasta cierto punto las colisiones de hadrones a pequeños valores de la transferencia de momento, distinguiendo dos regiones de energía: para bajas energías, las amplitudes de colisión se deben a las resonancias en el canal directo, y para altas energías el proceso se debe esencialmente al intercambio de Reggeones en el canal cruzado. En principio, ninguna de las dos imágenes es extrapolable de su zona de energía a la otra.

Cabría preguntarse qué es lo que sucede a energías intermedias. ¿Hay que tener en cuenta la suma de las dos contribuciones? Durante años ésta fue la opinión general hasta que surgió la idea de dualidad. Aunque la amplitud basada en el intercambio de Reggeones no explica los hechos experimentales de baja energía, es decir, los picos resonantes, sí explica los valores de la amplitud cuando ésta es promediada en intervalos de energía mayores que la anchura de los picos. La constatación de este hecho llevó a Dolan, Horn y Schmid a la idea de que ambas imágenes eran duales una de la otra, no en sentido local, sino en sentido global o de valores promediados. De esta manera las resonancias en el canal directo producían, por así decir, los intercambios de Reggeones ordinarios en el canal cruzado, de manera que la teoría ganaba consistencia y simplicidad.

En esta idea de dualidad desempeñaba un papel aparte la contribución de la singular trayectoria del vacío o pomeron. Tal trayectoria debía considerarse dual, no a las resonancias del canal directo, sino al fondo no resonante sobre el que aparecen las resonancias. La idea de la dualidad condujo a múltiples y fructuosos análisis de los datos experimentales, especialmente en forma de reglas de suma a energía finita, y también a la elaboración de los llamados modelos duales, cuyo principal ingrediente era la dualidad.

A pesar de los éxitos del modelo de polos de Regge, se presentaban también



LA IDEA DE DUALIDAD aparece en esta gráfica. En ella se indica el comportamiento con la energía de una cantidad relacionada con la sección eficaz de colisión calculada mediante la teoría de Regge *(color)* y se compara con el comportamiento experimental de las oscilaciones resonantes. Esa teoría es una buena aproximación a la media de los valores experimentales, de acuerdo con la idea de la dualidad global.

puntos obscuros. El primero de ellos era de tipo conceptual: se demostró que las amplitudes de colisión debían tener necesariamente, junto con los polos, cortes en el plano complejo, provenientes del intercambio de dos polos a la vez. La existencia de estos cortes de Regge, además de complicar la estructura analítica de la amplitud, hacían que el modelo fuese muy poco apto para un análisis fenomenológico de los datos. Si sólo hay polos, la contribución de cada polo a la amplitud queda determinada por su posición [$\alpha(o)$ y α' en el caso de trayectorias lineales] y por el acoplamiento de Reggeon a la partícula. Por el contrario, para fijar la contribución de un corte hay que dar el valor de la discontinuidad de la función a lo largo del corte, lo cual introduce una excesiva libertad de interpretación de los datos. Estas dificultades, sin embargo, quedan algo subsanadas debido a que, en lo que respecta a la energía, las contribuciones de los cortes sólo modifican las amplitudes en dependencias logarítmicas.

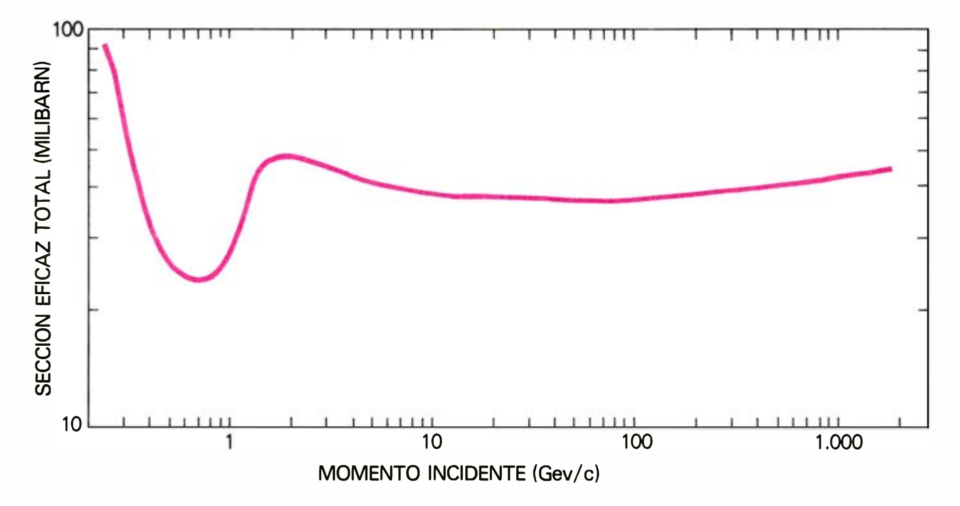
La otra dificultad era la existencia de algunos hechos experimentales evidentes que no podían explicarse con el modelo de Regge. Por ejemplo, la polarización en la colisión con intercambio de carga $\pi^- p—\pi^0 n$, el aumento (logarítmico) de la sección eficaz con la energía, la estructura de las secciones eficaces diferenciales, etcétera, apuntan a la existencia de otras singularidades además de simples polos de Regge.

Los hechos expuestos, y especialmente la acumulación de datos experimentales obtenidos en los grandes aceleradores, han llevado a reconsideraciones sobre el modelo de polos de Regge. En esta zona de grandes energías la contribución de las trayectorias de Regge ordinarias es prácticamente despreciable e influye sólo la trayectoria del pomeron. Por otro lado, el crecimiento logarítmico de la sección eficaz pone de manifiesto la importancia cada vez mayor de los cortes de Regge debidos al intercambio de varios pomerones en el canal cruzado, síntoma de complejas estructuras analíticas en el plano del momento angular complejo.

A fin de explicar esta complicada estructura analítica, ha surgido en los últimos diez años, y a partir de un trabajo inicial del físico ruso V. N. Gribov, la llamada teoría de campos de Reggeones. En ella se considera a los Reggeones, y en especial al pomeron que será quien domine a altas energías, como una cuasipartícula en un espacio de dos dimensiones espaciales y una temporal. Dicha teoría, encaminada al estudio de fenómenos en que la transferencia de momento sea pequeña, es decir, de pequeño momento según la dirección transversal a la dirección del haz de la partícula dispersada, surge de la consideración de ciertas clases de diagramas de teoría de campos y satisface por construcción las relaciones de unitariedad en el canal cruzado. Parece que también satisface la unitariedad en el canal directo, pero, a pesar de muchos intentos, ello no ha sido demostrado. En esta teoría los Reggeones son capaces, además de acoplarse a las partículas físicas, de interaccionar consigo mismo en acoplamientos de tres o más Reggeones.

Los parámetros libres que se introducen en la teoría son el valor de la trayectoria del pomeron en el origen $\alpha_p(o)$ y una constante de acoplamiento de tres pomerones r (se demuestra que los efectos de otros tipos de acoplamiento no modifican los rasgos generales de la teoría). Una vez escrito el lagrangiano, al igual que ocurre en toda teoría de campos puede tratarse su resolución mediante métodos perturbativos, válidos probablemente si la constante de acoplamiento efectiva es pequeña; en este desarrollo perturbativo se estudian sucesivamente los procesos en que se intercambien, o interaccionen, un número de pomerones cada vez mayor. Dado que el parámetro típico del desarrollo perturbativo crece como log$s$, es de esperar que al aumentar la energía, cada vez será más problemática la convergencia de la serie perturbativa.

Hasta el momento, los cálculos realizados siguiendo esta vía perturbativa permiten explicar satisfactoriamente los datos experimentales. Sin embargo, dejando aparte la ausencia de una demostración de la convergencia de la serie, es de esperar que, al menos para las energías de los futuros aceleradores o de los rayos cósmicos, empiecen a surgir dificultades.



COMPORTAMIENTO con la energía de la sección eficaz total protón-protón hasta las energías mayores alcanzadas en aceleradores (ISR del CERN). El aumento logarítmico (como $\log^2 s$?) de la sección eficaz es claro y se confirma a energías mayores con datos provenientes de experimentos de rayos cósmicos.

Por ello resulta de gran interés analizar soluciones no perturbativas de la teoría cuántica de campos de Reggeones a energías asintóticas, es decir, muy elevadas. Tales soluciones se basan en el grupo de renormalización de la teoría y en la resolución de la ecuación diferencial del grupo. La renormalización de la teoría consiste, como en cualquier teoría de campos (renormalizable), en estudiar cómo las propias interacciones del pomeron modifican los parámetros desnudos introducidos, $\alpha_P(o)$ y r, convirtiéndolos en unos nuevos valores renormalizados que son los que se miden experimentalmente.

En este análisis desempeña un papel fundamental el valor que se introduce para $\alpha_P(o)$ desnudos. Para valores menores que un cierto valor crítico se obtiene que, a energías asintóticas, las secciones eficaces totales decrecen al aumentar la energía, en aparente contradicción con la tendencia de los datos experimentales (si es que ya se está llegando a la energía asintótica). Para valores mayores que el valor crítico, el análisis teórico es aún confuso; además, debido a la complejidad matemática del problema, no es claro si las secciones eficaces totales decrecen o crecen como $\log^2 s$, lo que podría estar de acuerdo con la actual tendencia de los datos y no violaría la cota de Froissart. Finalmente, para el pomeron crítico, que es aquel que produce un $\alpha_P(o)$ renormalizado igual a uno, se obtiene que la sección eficaz total crece como log.s elevado a la potencia $-\gamma$ (con γ negativo), y la sección eficaz diferencial muestra un pico de difracción para ángulos de colisión pequeños, decreciendo a medida que aumenta el ángulo, y formando, después de un mínimo, un segundo pico varios órdenes de magnitud menor que el primero. Por el momento no podemos decir cuál de estas tres casos corresponde al mundo físico. Aunque quizás algunos datos parezcan favorecer un pomeron supercrítico, vamos a esbozar en lo que sigue las líneas generales de la solución crítica que es probablemente la más simple y elegante de las tres.

La importancia de la solución correspondiente al pomeron crítico radica en que los resultados obtenidos no dependen esencialmente de la teoría inicial usada. Ello es importante, pues el detalle de la teoría introducida así como el tipo de acoplamiento entre pomerones se basa en hechos experimentales a las energías actuales y, por tanto, no son del todo precisos.

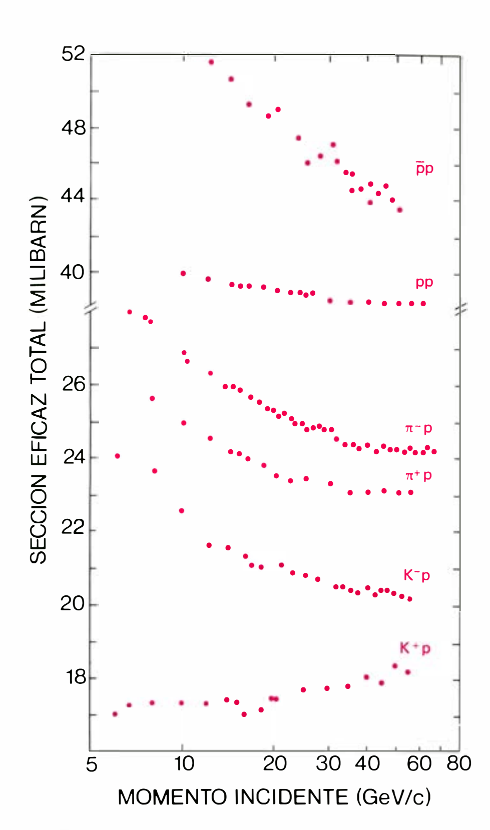
El problema del pomerón crítico es, desde un punto de vista formal, un típico problema de transiciones de fase de segundo orden, como el que aparece en la magnetización de un material ferromagnético a la temperatura de Curie. En un tal material existe una temperatura llamada de Curie por debajo de la cual los spines están orientados en cierta dirección, es decir, muestran un cierto orden y por encima de la cual se desordena el sistema. Dicho de otra manera, una cierta magnitud física tiende a infinito cuando la temperatura tiende a la temperatura crítica; la forma como tiende a infinito depende de un exponente llamado exponente crítico.

En estos fenómenos críticos sucede que aparecen en los sistemas correlaciones de largo alcance, en que los átomos no sólo interaccionan con sus vecinos más próximos, sino con todos los demás. El comportamiento crítico no queda determinado por los detalles de las fuerzas de corto alcance, sino por las simetrías globales del sistema y las dimensiones de la red cristalina. Sistemas que tengan iguales simetrías globales e igual dimensionalidad tendrán el mismo comportamiento crítico independientemente de los detalles de la interacción de corto alcance. A esta propiedad se le llama universalidad.

La manera de estudiar el comportamiento crítico consiste en realizar una transformación de las coordenadas que describen el sistema elemental a otras coordenadas que describen promedios sobre un gran número de átomos, de manera que al realizarse el promedio se difuminen las fuerzas de corto alcance, pero no se modifiquen las simetrías y dimensiones del sistema. Tal transformación de coordenadas debe ser una propiedad de simetría del hamiltoniano que describe el sistema, sea cual sea el dominio sobre el que se promedia, y es un elemento del grupo de renormalización.

El estudio y resolución de la ecuación diferencial del grupo de renormalización es el que proporciona la solución deseada del sistema. En dicha solución aparecen exponentes críticos, uno de los cuales es la antes mencionada γ, que determina el crecimiento de la sección eficaz total. La resolución de la ecuación es complicada, pues en ella aparecen funciones que deben calcularse por métodos aproximados. Por ello, el cálculo de los exponentes críticos depende del método usado, aunque muy recientemente han habido resultados de elevado grado de fiabilidad.

El tipo de comportamiento asintótico de la teoría para el pomeron crítico es de esperar, por las razones expuestas, que será independiente del tipo preciso de las interacciones entre pomerones. Ello es importante, como hemos dicho, pues los valores introducidos no son del todo precisos. Por otro lado, según un criterio de unificación de todas las interacciones físicas, los valores desnudos introducidos deben poderse justificar en el marco de una teoría de campos de las interacciones fuertes de amplio ámbito de aplicación. El día



COMPORTAMIENTO de las secciones eficaces totales con la energía hasta un momento de 70 GeV/*c*. En la figura no se aprecia el comportamiento resonante, correspondiente a momentos menores, pero sí el comportamiento asintótico predicho por la teoría de polos de Regge. El valor asintótico se alcanza precozmente en K^+p y en *pp*, ambos canales exóticos, es decir, sin resonancias en el canal directo. La tendencia a satisfacerse el teorema de Pomeranchuck también se ve claramente. Asimismo, empieza a observarse un crecimiento lento de las secciones eficaces totales (ordenadas) con la energía (abscisas).

en que dispongamos de una tal teoría, podremos deducir de ella las constantes $\alpha_P(o)$ y r, y aunque no obtengamos exactamente los valores que estamos utilizando, si el Pomeron es crítico, tendremos garantía de que el comportamiento asintótico de la teoría no se alterará.

El candidato actual a esta teoría general lo constituye la cromodinámica cuántica en la que los campos de materia son quarks de diversos colores y sabores y los cuantos de la interacción son los gluones. En estos momentos se está estudiando si dicha teoría produce un pomeron similar al analizado antes, pero la situación sigue sin resolverse.

Por otro lado, gravita la pregunta de qué significa una energía asintótica. La respuesta tampoco es definitiva, y tanto pueden darse argumentos que sitúan estas energías asintóticas fuera del alcance de todo acelerador previsible, como a las energías de los anillos de almacenamiento del CERN. De hecho, las formas de las secciones eficaces experimentales a la mayor energía alcanzable tienen gran similitud con las predicciones del pomeron crítico, y quizás estemos entrando ya en el umbral de las "grandes" energías.

El termostato de los vertebrados

El hipotálamo, estructura situada en la base del cerebro, controla la temperatura corporal y la mantiene a un nivel óptimo mediante la integración de los mecanismos de termorregulación

H. Craig Heller, Larry I. Crawshaw y Harold T. Hammel

La actividad funcional de los vertebrados alcanza su máxima eficacia dentro de un estrecho margen de temperaturas corporales. El límite superior para la supervivencia es aproximadamente de 45 grados Celsius (113 grados Fahrenheit), a partir de los cuales las proteínas empiezan a desnaturalizarse y pierden su actividad; el límite inferior queda algo por debajo de los cero grados Celsius (32 grados Fahrenheit), a partir de los que el agua intracelular inicia la formación de cristales de hielo que rompen y destruyen las células. Incluso entre los extremos citados, pequeñas desviaciones del nivel óptimo de la temperatura del cuerpo pueden tener efectos adversos, porque cada proceso fisiológico implica la integración de muchas reacciones bioquímicas, cuya intensidad depende, de forma muy específica, de la temperatura. El resultado de la integración de dichas reacciones puede quedar alterado cuando la temperatura varía. A pesar de estas realidades fisiológicas, los vertebrados se desarrollan prácticamente en la totalidad de los hábitats de la tierra, desde las heladas aguas de los mares polares hasta el implacable calor de los desiertos tropicales. El tema de este artículo trata del modo en que los vertebrados mantienen una temperatura interna favorable en ambientes térmicos tan hostiles.

Aunque generalmente, como veremos, los vertebrados están divididos de forma incorrecta en dos grupos principales: animales de "sangre fría" y animales de "sangre caliente". Los biólogos denominan a estos grupos "poiquilotermos" y "homeotermos", respectivamente, aludiendo a sus principales fuentes de calor. Los poiquilotermos (peces, anfibios y reptiles) tienen un escaso aislamiento corporal y bajas intensidades de producción de calor metabólico. La temperatura de su cuerpo depende en gran parte del calor procedente del ambiente, y su mecanismo de termorregulación más importante es la selección de un ambiente o "microclima" adecuado. En ausencia de una fuente importante de energía radiante, como el sol, los poiquilotermos prefieren permanecer a una temperatura ambiente casi igual a la de su temperatura corporal óptima.

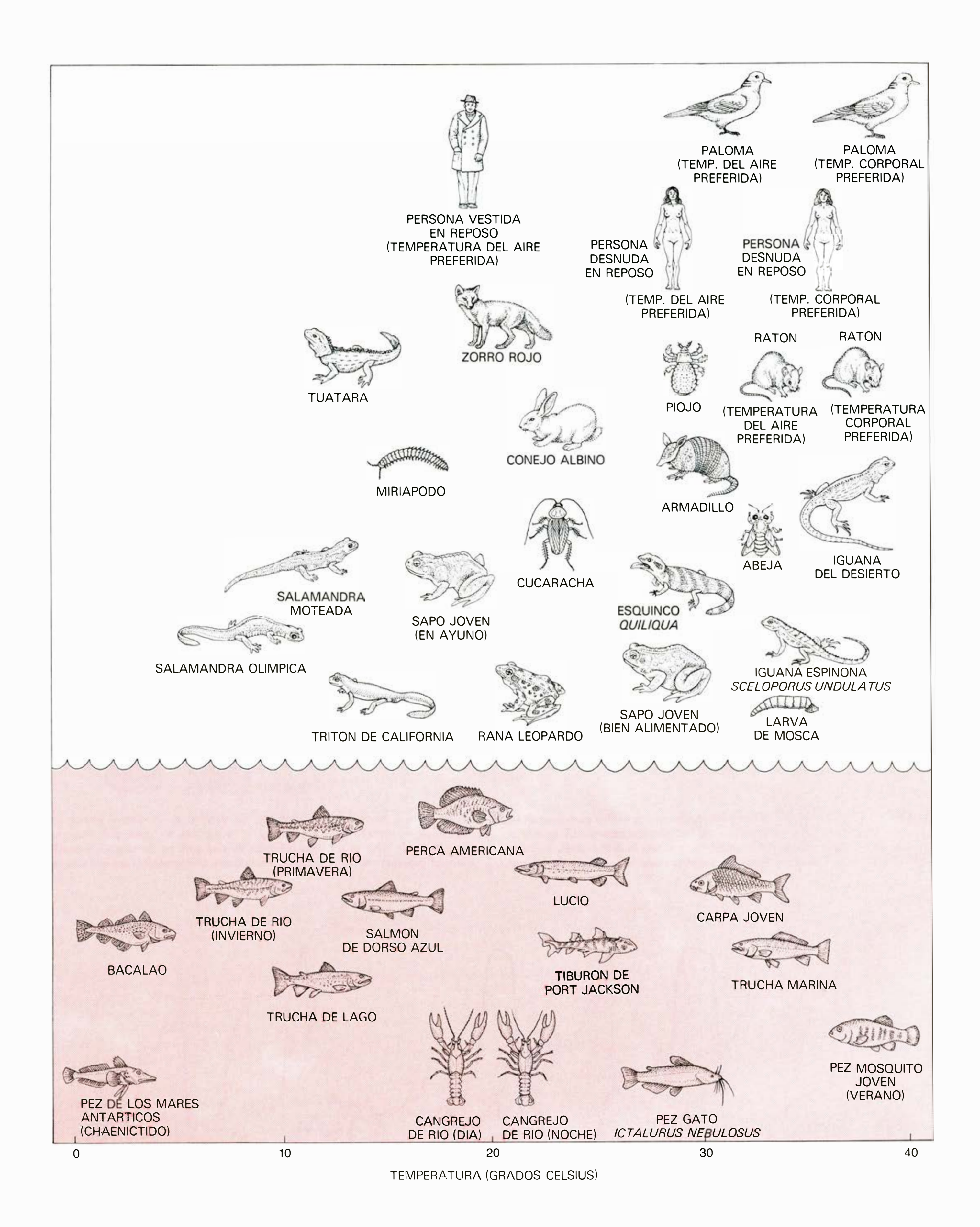
En contraste con ellos, los homeotermos (aves y mamíferos) poseen generalmente un buen aislamiento mediante pelaje, plumas o grasa y tienen una intensidad de metabolismo basal, por lo menos, cinco veces superior a la de los poiquilotermos del mismo tamaño y temperatura corporal similar. Cuando se somete a los homeotermos a un ambiente frío, aumenta su intensidad de producción de calor metabólico; manteniendo así la temperatura de su cuerpo a un nivel óptimo. A causa de su alta intensidad de metabolismo, los homeotermos dispersan una cantidad significativa de calor hacia el medio ambiente para evitar el aumento de su temperatura corporal. En consecuencia, los homeotermos prefieren siempre una temperatura ambiente algo inferior a su temperatura corporal óptima, de forma que el calor pueda perderse pasivamente a favor del gradiente térmico. Por ejemplo, un hombre vestido mantiene una temperatura corporal interna de unos 37 grados Celsius (98,6 grados F.) pero prefiere una temperatura ambiente próxima a los 22 grados C. (71,6 grados F.).

Los homeotermos, además de intensidades de metabolismo variables, han desarrollado mecanismos fisiológicos para regular su temperatura corporal. Estos mecanismos adicionales controlan la intensidad con la que el animal intercambia calor con su ambiente. El poder aislante del pelaje o de las plumas puede ser modificado mediante músculos que controlan su posición. Además, la capacidad de aislamiento de la piel es variable. El calor es transportado rápidamente por la sangre del centro del cuerpo a la piel, desde donde se disipa al ambiente; la intensidad de pérdida de calor puede ser controlada por la dilatación o constricción de las arteriolas de la piel. En muchas especies, la pérdida de calor corporal a través de un apéndice con escaso aislamiento se controla por medio de intercambio de calor entre la sangre conducida por los vasos hacia el apéndice y la que procede de él.

Otra manera de disipar calor al ambiente es mediante la evaporación de agua en la piel o superficies respiratorias. En muchas especies, esta forma de pérdida de calor se acentúa por los mecanismos de jadeo y sudoración. Para que la evaporación sea efectiva, el animal debe dirigir la cantidad de sangre adecuada hacia el área enfriada.

Hasta que se realizaron medidas de campo de la temperatura del cuerpo en diversos reptiles propios de zonas templadas, los biólogos no fueron conscientes de las posibilidades termorreguladoras de los poiquilotermos. De forma sorprendente se encontró que, independientemente de la temperatura del aire, la del cuerpo de los lagartos activos se mantiene dentro del margen comprendido entre 34 y 40 grados C. (93,2 a 104 grados F.). Desde entonces, se ha demostrado que muchos poiquilotermos pueden regular la temperatura de su cuerpo con gran precisión mediante su comportamiento. Por ejemplo, John R. Brett, trabajando en el Consejo de Investigaciones Pesqueras de Canadá-Estación Biológica de Nanaimo, Columbia Británica, descubrió que si a los salmones de dorso azul *(Oncorhynchus nerka)* jóvenes se les permitía elegir, seleccionaban aguas a 15 grados C. (59 grados F.); temperatura en la que su crecimiento, rendimiento cardíaco y velocidad de natación sostenida son máximos. Cuando a diversos poiquilotermos (incluyendo tiburones, peces teleósteos, anfibios y lagartos) se les dio a escoger entre dos temperaturas no óptimas, regularon su temperatura corporal al nivel preferido, con precisión notable, pasando alternativamente de un compartimento a otro.

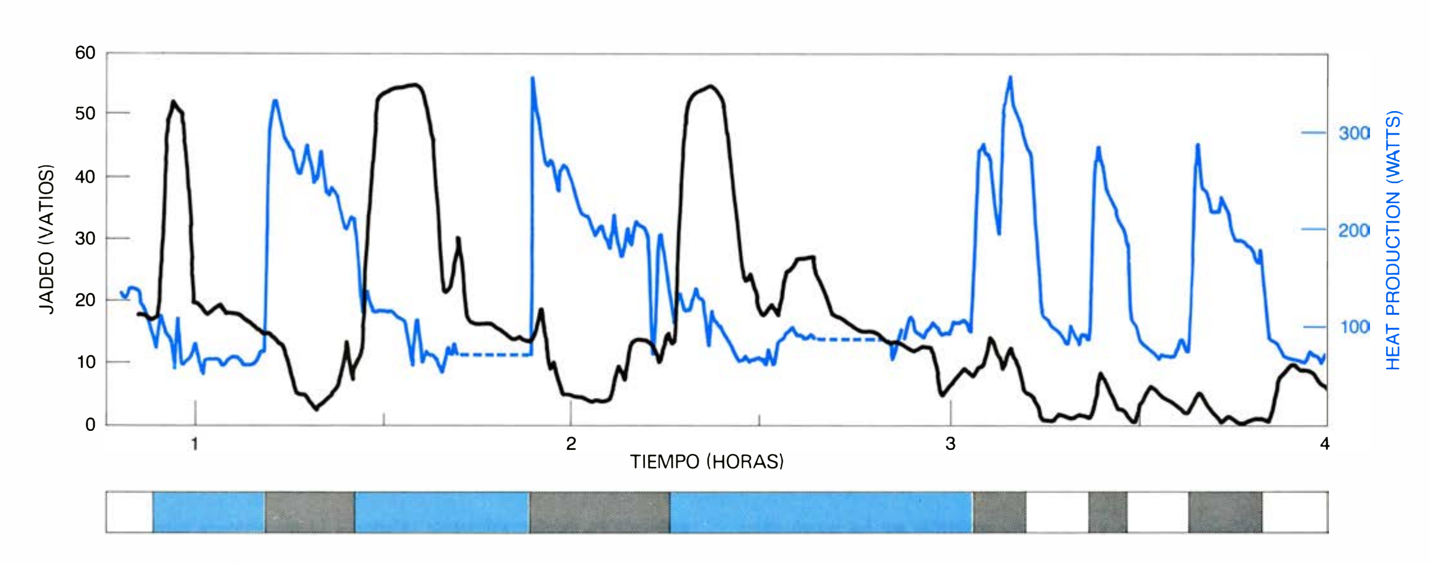
Recientemente se han descrito mecanismos efectores termorreguladores adicionales en los poiquilotermos. Eugene C. Crawford y Billy J. Barber, de la Universidad de Kentucky, encontraron que el lagarto "chuckwallah" *(Sauromalus obesus)* utiliza el jadeo como mecanismo para perder calor, si la temperatura de su piel o su



TEMPERATURAS del ambiente y del cuerpo preferidas por los vertebrados; varían mucho y dependen de las condiciones térmicas a las que el animal está adaptado. Para los poiquilotermos (animales que obtienen la mayor parte del calor corporal de su entorno), las temperaturas internas y ambientales preferidas son las mismas. Para los homeotermos (animales que obtienen la mayoría de su calor corporal a partir de procesos metabólicos internos), la temperatura ambiente es considerablemente inferior a la temperatura corporal preferida, porque el calor producido en su interior debe disiparse constantemente a lo largo del gradiente térmico. El cangrejo de río *(en la parte inferior de la ilustración, antes y después de los 20 grados C.)* **muestra que la temperatura preferida varía siguiendo un ritmo diario; en la trucha sigue un cambio estacional y el sapo nos da un ejemplo de variación dependiente del estado de nutrición.**

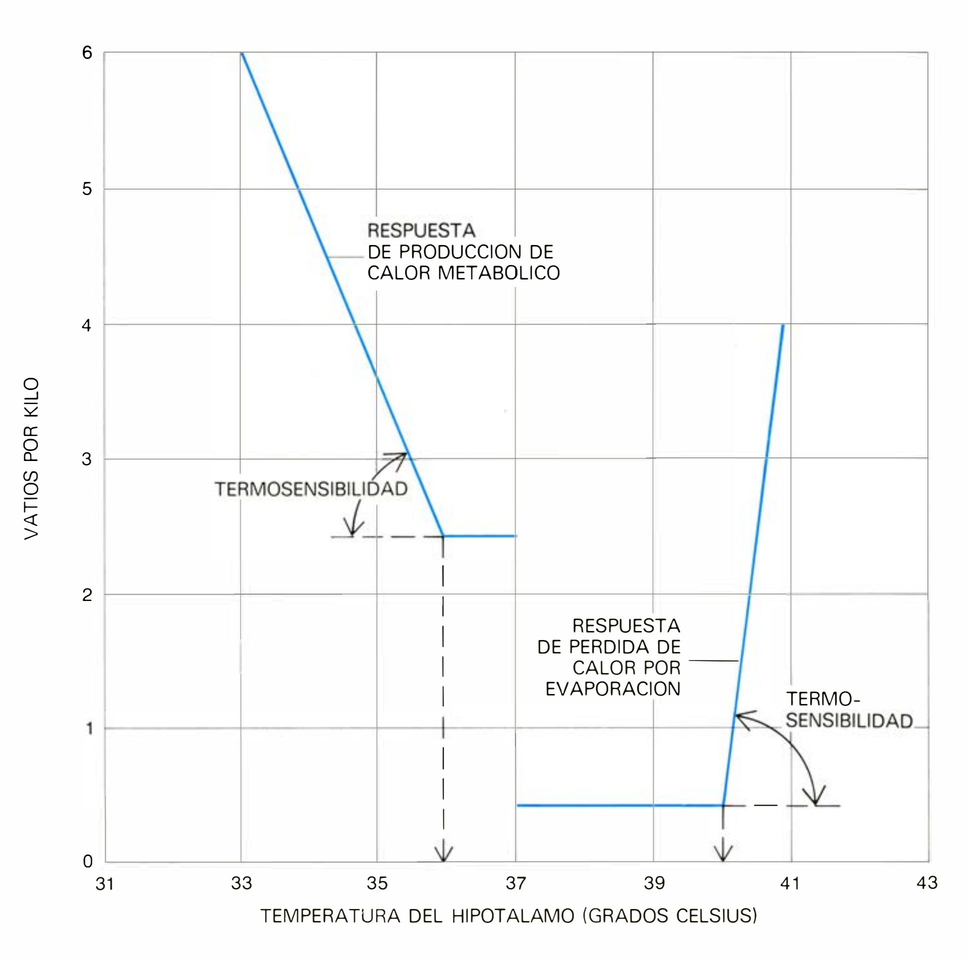
TRANSFORMADOR VARIABLE
CALENTADOR DE AGUA
ARDILLA TERRESTRE
AIRE
TUBO DE DESECADO
CAMARA METABOLICA
AIRE EXTERIOR
AGITADOR
BOMBA DE AGUA
BAÑO DE AGUA FRIA
REOMETRO
REGISTRADOR
ANALIZADOR DE HUMEDAD
TUBO DE DESECACION
ANALIZADOR DE OXIGENO
ANALIZADOR DE ANHIDRIDO CARBONICO
BOMBA DE AIRE
VACIADO
REOMETRO

APARATO EXPERIMENTAL, esquematizado, que se utiliza para determinar la sensibilidad térmica del hipotálamo en los micromamíferos. El animal se sitúa en una cámara metabólica hermética y se regula la temperatura del hipotálamo utilizando termodos: tubos de acero inoxidable, a través de los que circula agua a temperatura controlada. Se determina, al mismo tiempo, la intensidad de metabolismo del animal y la pérdida de agua por evaporación, haciendo circular un flujo conocido de aire seco por la cámara y analizando el contenido de agua, oxígeno y anhídrido carbónico del aire que efluye.



EL REGISTRO GRAFICO muestra los resultados de un experimento en el que el hipotálamo de un perro de raza "retriever Labrador" fue alternativamente calentado *(barras coloreadas)* y enfriado *(barras lisas)* mediante la implantación de termodos, registrándose las intensidades de las respuestas de termorregulación. El calentamiento del hipotálamo condujo a una pérdida rápida de calor corporal por evaporación de agua, principalmente a través del jadeo *(curva en color),* mientras que el enfriamiento del hipotálamo originó temblor y, en consecuencia, un aumento de la intensidad de metabolismo *(curva en negro).*

temperatura interna sobrepasan un cierto límite; y Marvin L. Riedesel, de la Universidad de New Mexico, mostró que las tortugas caja *(Terrapene sp)*, pueden, mediante el jadeo, mantener su temperatura corporal a unos 10 grados C. (50 grados F.) por debajo de la temperatura ambiente. Cuando los poiquilotermos no pueden conseguir ya el calor suficiente del medio, para mantener una temperatura del cuerpo elevada, buscan generalmente un lugar frío al resguardo de los depredadores y pierden su actividad. Esta respuesta puede darse también cuando la disponibilidad de alimento es insuficiente, pues un descenso de la temperatura corporal significa una reducción de la intensidad metabólica y en consecuencia un ahorro de las reservas vitales de energía. Como veremos, algunos homeotermos utilizan una estrategia similar cuando se enfrentan a condiciones ambientales adversas.



LAS RESPUESTAS DE TERMORREGULACION se desencadenan cuando la temperatura del hipotálamo sobrepasa, o bien es inferior, a las temperaturas umbrales específicas. Estos umbrales pueden ser afectados por diversos factores, como la temperatura ambiente, grado de actividad, sueño y agentes pirógenos. En las gráficas que aquí se muestran (correspondientes a un perro con una temperatura corporal óptima de 37 °C. y a temperatura ambiente de 25 grados) el valor del umbral hipotalámico al que se da la respuesta metabólica de calor es de 36° y el de la respuesta de pérdida de calor por evaporación es de 40 °C. Como indican las curvas, la intensidad de la respuesta termorreguladora es proporcional a la diferencia entre la temperatura real del hipotálamo y la temperatura umbral a la que se inicia la respuesta específica.

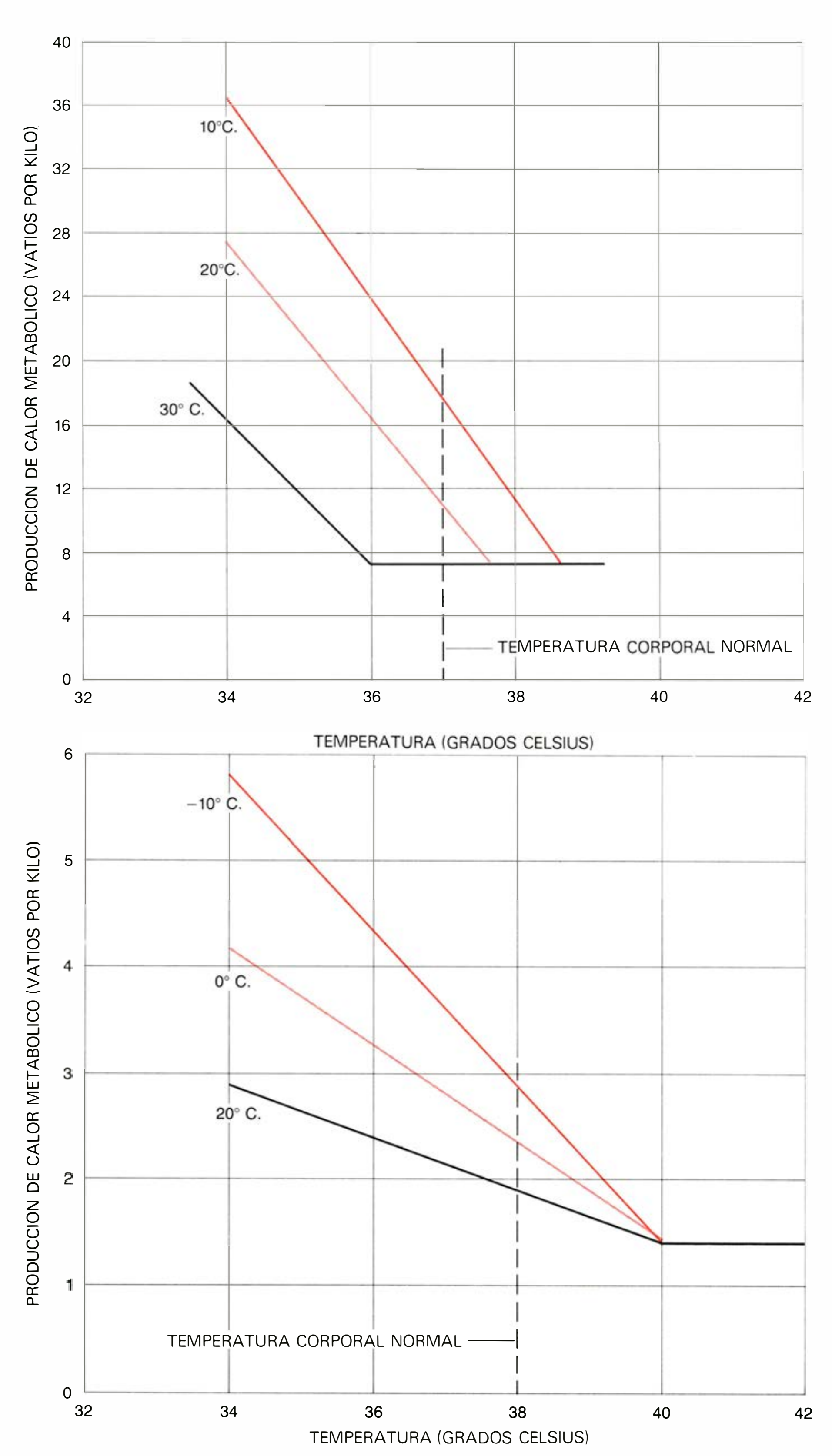
En la década de 1880-90, Charles Richet, en Francia, e Isaac Ott, en los Estados Unidos, observaron que, en los perros, la destrucción localizada de tejido del hipotálamo, en la base del cerebro, daba lugar al aumento de la temperatura corporal. En experimentos clásicos llevados a cabo por Henry G. Barbour en 1912 se implantaron termodos (circuitos termostáticos externos) de plata en el hipotálamo. Al enfriar los termodos, la temperatura corporal aumentaba, mientras que cuando se calentaban descendía. Experimentos subsiguientes llevados a cabo por numerosos investigadores, en diversos mamíferos, indicaron que la región del hipotálamo localizada sobre el quiasma óptico (lugar donde convergen los nervios ópticos, procedentes de los dos ojos) es esencial para la regulación de la temperatura del cuerpo. Actualmente se sabe que las funciones de termorregulación se centran en esta parte del cerebro en todas las clases de vertebrados.

¿Cuál es la naturaleza de este "termostato" interno y cómo regula la temperatura del cuerpo? Teniendo en cuenta la teoría de control se puede postular que el termostato debe reunir varias características. Primero, debe recibir información sobre la temperatura real del cuerpo, en todo momento, a través de un circuito recurrente como mínimo. Segundo, el termostato debe "conocer" la temperatura corporal óptima a la que debe ser programado, mediante algún tipo de punto de referencia. Tercero, el termostato debe ser capaz de comparar, en todo instante, la temperatura real del cuerpo con la óptima establecida y, si existe una diferencia, desencadenar los mecanismos adecuados de termorregulación, tanto fisiológicos como de comportamiento.

Como vemos, el hipotálamo es sensible a la temperatura. Cuando se calienta el hipotálamo de un homeotermo, el animal reacciona con respuestas de pérdida de calor como el sudor, el jadeo y la dilatación de los vasos sanguíneos periféricos. Cuando el hipotálamo se enfría, el animal reacciona con respuestas generadoras de calor, tales como tiritar, turgencia del pelaje y constricción de los vasos sanguíneos periféricos. El mecanismo de termorregulación más elemental –la búsqueda de un ambiente con condiciones térmicas adecuadas– es común a todos los vertebrados. Cuando se calienta el hipotálamo, poiquilotermos y homeotermos se comportan como si tuvieran demasiado calor y buscan un ambiente fresco para disminuir su temperatura corporal. El enfriamiento del hipotálamo suscita la respuesta contraria.

Uno de nosotros (Hammel), que trabajaba entonces en el laboratorio de la fundación John B. Pierce en la Universidad de Yale, consiguió determinar cuantitativamente las respuestas termorreguladoras de los perros en función de la temperatura del hipotálamo. Estos experimentos fueron factibles gracias al desarrollo de pequeños termodos de acero inoxidable que podían ser implantados de forma permanente en torno al hipotálamo de animales intactos. Los termodos fueron perfundidos con agua a temperaturas específicas para calentar o enfriar el hipotálamo. Se observaron los umbrales para el inicio de cada respuesta termorreguladora al modificar de forma sistemática la temperatura del hipotálamo de los perros. Cuando el hipotálamo se enfrió por debajo de una determinada temperatura se produjo temblor, y al calentarlo por encima de otra temperatura específica se produjo jadeo. Además, a temperaturas superiores al nivel umbral, la intensidad de la respuesta termorreguladora fue proporcional a la diferencia entre la temperatura umbral y la temperatura real existente en el hipotálamo. Estas características de sensibilidad térmica del hipotálamo son cualitativamente las mismas en todas las especies de mamíferos experimentadas.

¿Proporciona la temperatura del hipotálamo toda la información retroactiva que el sistema requiere para controlar el estado térmico del cuerpo? Dos observa-

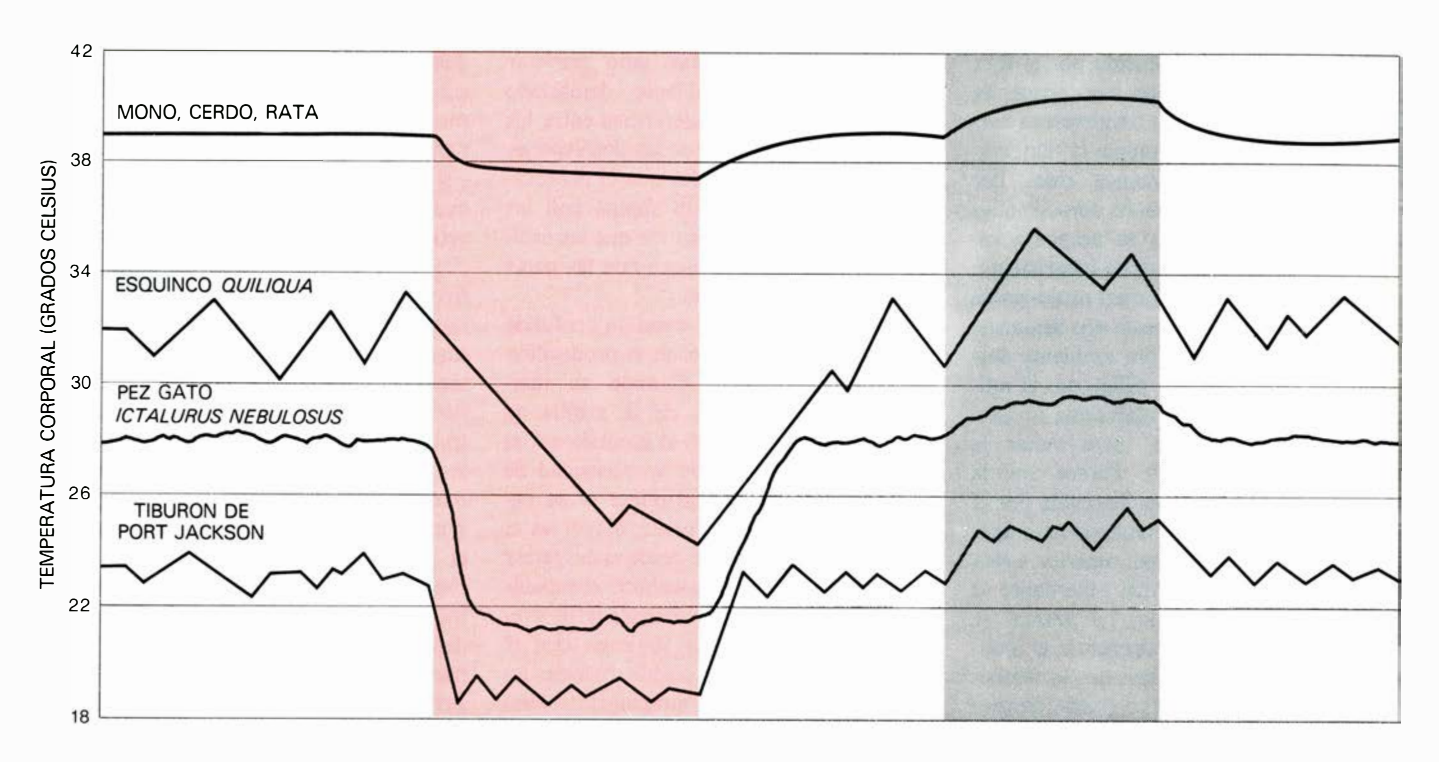


EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE sobre la intensidad de producción de calor metabólico. Ello indica que existen dos formas mediante las que la información procedente de los receptores periféricos puede alterar las características del termostato central. En la rata canguro *(gráfico superior)*, la temperatura umbral del hipotálamo en la que se desencadena la respuesta metabólica de calor, aumenta a medida que la temperatura ambiente decrece (se muestran las curvas de respuesta a tres temperaturas diferentes del ambiente). Esta elevación del umbral significa que no se precisa una disminución efectiva de la temperatura central del cuerpo para intensificar la producción de calor metabólico. De este modo, el termostato se anticipa a los cambios ulteriores de la temperatura corporal, y promueve ajustes compensatorios antes de que estas modificaciones se produzcan de hecho. En la foca común *(gráfico inferior)* el descenso de la temperatura ambiente no modifica el valor de la temperatura umbral del hipotálamo a la que se da la respuesta de producción de calor, sino que altera la sensibilidad del termostato, de modo que se genera mayor cantidad de calor por cada unidad de diferencia de temperatura con respecto al umbral hipotálamico. El cambio de sensibilidad se evidencia en la distinta pendiente de las curvas de respuesta.

ciones sencillas sugieren que el proceso es más complejo. Al someter a una persona a un ambiente frío empieza a tiritar de forma casi inmediata, antes de que se produzca descenso alguno de la temperatura del hipotálamo. De modo similar, al exponerse a un ambiente caluroso, como el de una sauna, empieza a sudar, antes de que se dé ningún aumento en la temperatura del hipotálamo. Ocurre como si el termostato previniera el cambio en la temperatura interna del cuerpo y desencadenara de inmediato una acción rectificadora. Una posible explicación de este hecho podría ser que los receptores periféricos de temperatura, situados en la superficie del cuerpo, suministran información al termostato central sobre los cambios súbitos en las condiciones térmicas del ambiente.

Esta hipótesis fue comprobada midiendo las respuestas de termorregulación producidas al calentar o enfriar el hipotálamo a distintas temperaturas ambientales. Experimentos en varias especies de mamíferos demuestran que, cuando la temperatura ambiente disminuye, la temperatura umbral a la que se desencadena la producción metabólica de calor aumenta. De hecho, a temperaturas ambientales bajas, las características del termostato varían, de manera que la producción metabólica de calor se mantiene a un nivel elevado sin ninguna modificación de la temperatura del hipotálamo. De esta forma, la respuesta de termorregulación acontece antes de que la temperatura interna del cuerpo haya descendido hasta un nivel peligrosamente bajo. Las oscilaciones en la temperatura ambiente pueden afectar también al termostato, alterando su sensibilidad térmica, es decir, la intensidad de la respuesta termorreguladora que se produce por unidad de cambio en la temperatura del hipotálamo. Esta modificación de sensibilidad se evidencia por una diferencia en la pendiente de la curva que relaciona la intensidad de la respuesta y la temperatura del hipotálamo.

El efecto de la temperatura ambiente sobre el termostato varía de una especie a otra. En la foca común, un descenso de la temperatura ambiente conduce a un amplio aumento en la sensibilidad térmica del hipotálamo, sin que varíe el umbral térmico en el que se desencadena la respuesta de producción metabólica de calor. Por otra parte, la ardilla *Ammospermophilus harrisii* muestra una relación inversa normal entre la temperatura ambiente y la temperatura umbral del hipotálamo para el desencadenamiento de la respuesta de producción de calor metabólico, aunque también una sensibilidad hipotalámica máxima a altas temperaturas del ambiente. Esa ardilla es un animal del desierto que desarrolla su actividad durante el día, por lo que está altamente adaptada



TERMORREGULACION POR COMPORTAMIENTO en los vertebrados; se demuestra mediante experimentos en los que se da a elegir a los animales entre dos ambientes térmicos, uno con temperatura superior y otro con temperatura inferior a la corporal preferida. Tanto los homeotermos como los poiquilotermos mantienen la temperatura corporal a este nivel, pasando alternativamente de un compartimento al otro. El calentamiento del hipotálamo *(color)* da lugar a la disminución de la temperatura corporal preferida, mientras que el enfriamiento *(gris)* de esa estructura del cerebro conduce a la elevación de ésta.

para mostrarse muy sensible a los cambios en su temperatura central del cuerpo a elevadas temperaturas del medio ambiente.

En síntesis, el termostato central de los animales vertebrados es capaz de obtener información sobre la temperatura ambiente a partir de los receptores periféricos de la superficie del cuerpo; estas señales de entrada modifican entonces las características del termostato, de forma que se consiguen respuestas termorreguladoras diferentes, sin cambios en la temperatura del hipotálamo. Es la capacidad de respuesta ante los cambios súbitos de la temperatura ambiente lo que confiere al termostato de los vertebrados su poder de anticipación. El animal es capaz de prever un cambio en el contenido de calor del cuerpo, y originar una acción rectificadora antes de que éste ocurra realmente.

Existen, sin embargo, algunas situaciones en las que auténticas alteraciones de la temperatura del hipotálamo activan respuestas termorreguladoras en los mamíferos. Por ejemplo, al iniciarse un proceso febril se produce un aumento de la temperatura a la que se regula el cuerpo; y al comienzo del sueño se da un descenso de la temperatura corporal. Estos cambios se producen como consecuencia de desplazamientos de los umbrales hipotalámicos para el desencadenamiento de las respuestas termorreguladoras y de modificaciones en la sensibilidad térmica del hipotálamo. Hasta que se alcanza un nuevo equilibrio, las respuestas de termorregulación están influidas directamente por la divergencia entre las nuevas condiciones características del termostato y la temperatura real hipotalámica.

Los cambios en la temperatura del hipotálamo también pueden constituir la señal activadora fundamental para las respuestas termorreguladoras en los micromamíferos, cuyas temperaturas corporales y cerebrales son más variables y están más estrechamente ligadas a la temperatura ambiente. Los micromamíferos como las ardillas terrestres, ardillas listadas, ratas canguro y ratas de bosque *(Neotoma sp)*, tienen todos sensibilidades térmicas hipotalámicas muy superiores a las de los mamíferos de mayor talla como las focas, gatos, perros y conejos. Cuando el tamaño corporal aumenta también lo hace la ganancia o pérdida de calor corporal necesario para que se detecte una modificación en la temperatura central del cuerpo. En consecuencia, la importancia de los receptores periféricos de temperatura aumenta con el tamaño corporal.

El ejercicio físico supone otra circunstancia en la que los responsables principales del desencadenamiento de respuestas termorreguladoras son los cambios fisiológicos en la temperatura central del cuerpo. En el hombre, como todos saben, el ejercicio sostenido va acompañado por un aumento en la producción de sudor. Ethan R. Nadel y sus colaboradores del laboratorio de la fundación John B. Pierce demostraron, sin embargo, que, a una temperatura ambiental dada, la intensidad de sudoración tiene poca correlación con el grado de ejercicio físico; no obstante, sí que está íntimamente correlacionada con la temperatura central del cuerpo (no se sabe si el aumento en la temperatura del cuerpo afecta originalmente al hipotálamo o a otras partes del sistema nervioso, como la médula espinal). Por otra parte, en el perro el hipotálamo recibe aparentemente información directa procedente de los receptores sensoriales de las articulaciones y músculos, de modo que el jadeo se inicia al poco de comenzar el ejercicio y antes de que la temperatura central del cuerpo aumente.

La hibernación de los mamíferos constituye un fenómeno sugestivo desde el punto de vista de la regulación térmica. Cuando un animal se dispone a hibernar se confina en una madriguera o escondrijo aislado y pierde su actividad. Su temperatura desciende, entonces, hasta hacerse muy próxima a la del ambiente. Durante mucho tiempo, bastantes biólogos supusieron que los mamíferos hibernantes abandonaban temporalmente la termorregulación y volvían al estado más primitivo de heterotermia, propio de sus antecesores los reptiles. Estudios recientes han demostrado que la hibernación no implica un abandono de la termorregulación sino un descenso regulado con precisión de los puntos de ajuste del termostato central para conseguir un ahorro de energía.

El que la hibernación constituye una condición regulada fue sugerido en primer lugar por la observación de que, aunque los poiquilotermos necesitan una fuente externa de calor para recuperarse del es-

tado de somnolencia inducido por el frío, los mamíferos hibernantes son capaces de despertar y recuperar su temperatura corporal normal, incluso aunque la temperatura ambiente se mantenga baja. Por ejemplo, la ardilla de manto dorado *(Callospermophilus lateralis)* se despierta varias veces durante la época de hibernación; sus períodos de sopor pueden prolongarse desde menos de un día hasta dos semanas. Además, si la temperatura ambiente descendiera hasta un nivel peligroso, el animal despertaría, lo que representa un mecanismo de "seguridad" para evitar la muerte por congelación. Parece que la temperatura de alarma es detectada por el hipotálamo, pues si se mantiene la temperatura ambiente a un nivel superior a ésta y el hipotálamo del animal hibernante se enfría mediante termodos, el animal se despierta. De manera recíproca, si el hipotálamo se calienta ligeramente, la temperatura del resto del cuerpo puede descender por debajo del punto de alarma sin que el animal se despierte. Esto ocurre al cesar el calentamiento del hipotálamo.
tado aplicando un estímulo frío a su pata: estas especies parecen depender de recepsibilidad a las bajas temperaturas en otras tres especies de mamíferos hibernantes: la ardilla terrestre, el hámster turco y el lirón careto. Descubrió que la ardilla y el hámster dejan de hibernar al enfriar su cabeza mediante un termodo externo, pero que continúan hibernando si ésta se calienta y el cuerpo se enfría por disminución de la temperatura del ambiente. En contraste, el lirón careto puede ser despertado aplicando un estímulo frío a su pata: estas especies parecen depender de receptores térmicos periféricos para prevenir temperaturas del ambiente demasiado bajas. En vista de las diferencias entre los dos sistemas de alarma de las dos especies resulta interesante señalar que el lirón careto hiberna en posición supina con las patas sobresaliendo, mientras que las ardillas y los hámsters lo hacen con las patas recogidas bajo el cuerpo.

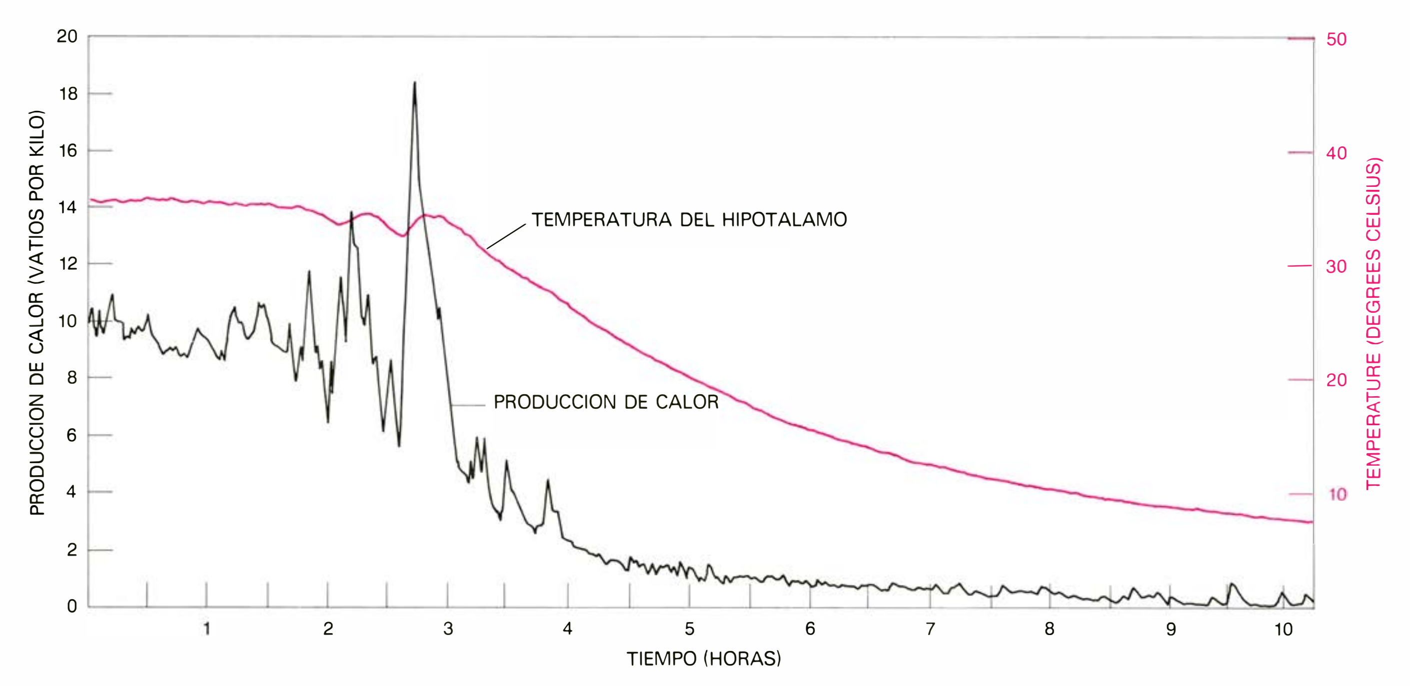
El despertar de la hibernación profunda implica un gran aumento de la producción de calor metabólico. Cuando se interrumpe la hibernación de la ardilla de manto dorado enfriando el hipotálamo, el aumento subsiguiente de la intensidad de metabolismo puede suprimirse si se calienta el hipotálamo. Cuanto mayor es el intervalo que transcurre desde el despertar del animal, más debe calentarse el hipotálamo para suprimir la respuesta termorreguladora. Estos hechos sugieren que el termostato del animal en hibernación no se activa o desconecta simplemente sino que es capaz de actuar con una gran variedad de condiciones de ajuste diferentes.

Además de la respuesta de alarma al enfriamiento excesivo del hipotálamo, la ardilla en período de hibernación puede elaborar respuestas termorreguladoras de producción de calor de tipo proporcional, sin salir del estado de sopor, cuando se enfría su hipotálamo en un margen de temperaturas inmediatamente superior a la que origina la reacción de alarma. Mientras que esta reacción se caracteriza por un brusco aumento de la temperatura de ajuste del termostato, después de las respuestas proporcionales no se produce este incremento. La sensibilidad del termostato, cuantificada por la proporción en que un cambio en la temperatura corporal suscita una respuesta termorreguladora, es muy inferior cuando la ardilla está hibernando que cuando permanece activa, pero sus características cualitativas de sensibilidad térmica son las mismas en el animal activo que en el animal en hibernación

¿Puede el mismo termostato ser operativo a través de toda la gama de temperaturas por las que pasa el hibernante? Sometimos a prueba esta hipótesis calentando y enfriando el hipotálamo durante períodos cortos, mientras el animal entraba en hibernación. A distintos intervalos de tiempo, durante esta fase, determinamos la mayor temperatura hipotalámica a la que se produjo un incremento de la intensidad de calor metabólico generado, y la temperatura más baja que no indujo esta respuesta. Estos experimentos demostraron la persistencia de la funcionalidad del termostato a través de toda la gama de temperaturas a las que se somete el hibernante, y probaron que la entrada en hibernación está asociada con un descenso progresivo en los valores de ajuste del termostato.

Cuando el animal va a iniciar el período de hibernación, la disminución de la temperatura corporal y de la intensidad metabólica no siempre se realizan con suavidad. Se dan irrupciones de producción de calor metabólico y de temblor que frenan o invierten momentáneamente el descenso de la temperatura corporal.

Parece ser que estas oscilaciones tienen lugar en los momentos en que la temperatura del hipotálamo queda por debajo de las temperaturas límites, cada vez más bajas, a las que se ajusta el termostato.



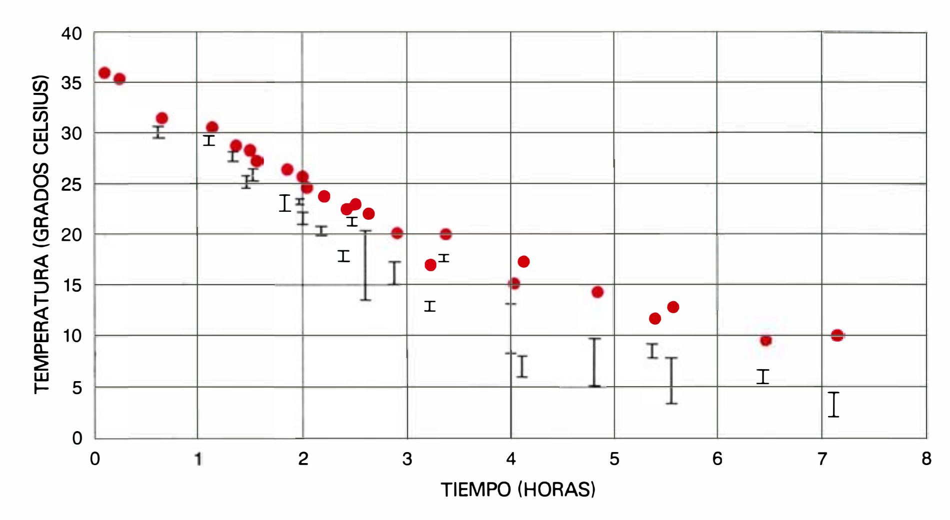
ENTRADA EN HIBERNACION de la ardilla de manto dorado *(Callospermophilus lateralis)*, controlada en este registro, que muestra la intensidad de producción de calor metabólico y la temperatura del hipotálamo del animal durante un lapso de tiempo. La que, en otras circunstancias, es una curva de enfriamiento pasivo, se interrumpe por oscilaciones debidas a la generación de calor metabólico cada vez que la temperatura del animal decae temporalmente por debajo del punto de ajuste inferior del termostato. Ello sugiere que el termostato no se "desconecta": durante la hibernación permanece "más bajo".

También algunos poiquilotermos quedan aletargados bajo ciertas condiciones: las serpientes y los lagartos buscan escondrijos fríos al final del día, la trucha de río prefiere el agua más fría en invierno que en primavera y los sapos buscan un ambiente más frío cuando carecen de alimento. No se sabe todavía si estos animales experimentan desplazamientos regulados en los valores a los que se ajusta su termostato central.

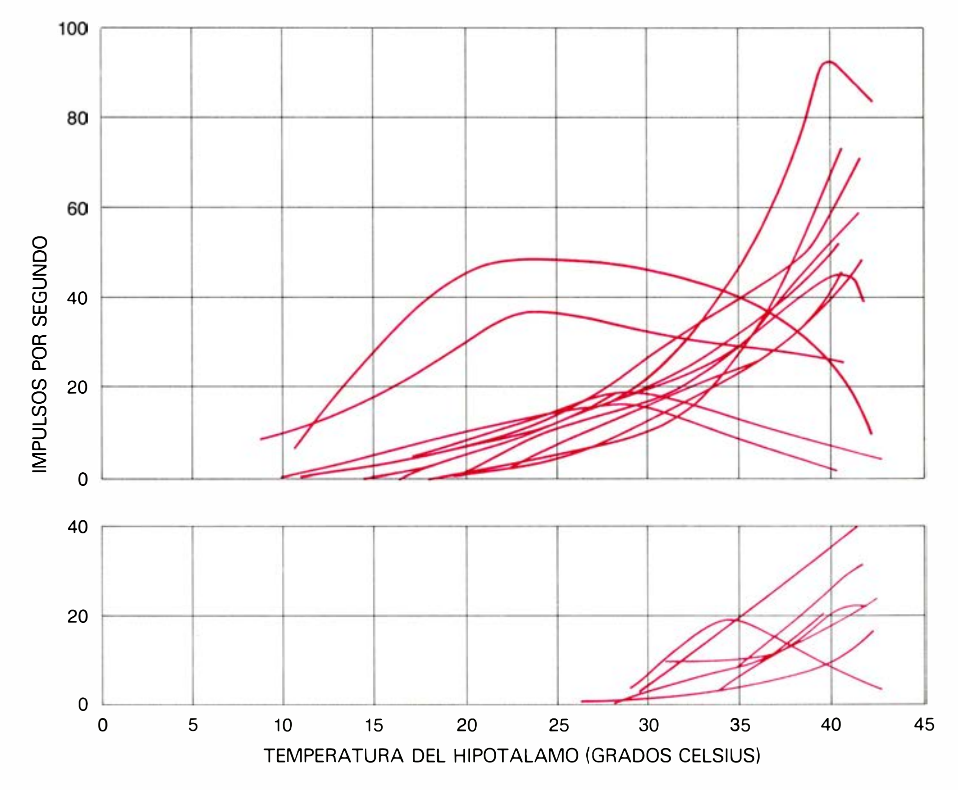
Las aves, que al igual que los mamíferos descienden de primitivos reptiles, desarrollaron la homeotermia de un modo paralelo a aquéllos. Lo poco que se conoce sobre el termostato de las aves sugiere que es algo distinto del de los mamíferos. Existe un aspecto diferencial, pues aunque el hipotálamo de las aves desempeña un importante papel en la integración de las respuestas de termorregulación, es virtualmente insensible a la temperatura. En su lugar, células termosensibles de la médula espinal constituyen la mayor fuente de información sobre la temperatura central del cuerpo. Werner Rautenberg y sus colaboradores en la Universidad de Ruhr han demostrado que el enfriamiento de la médula espinal de palomas, haciendo circular agua a través de un tubo muy fino insertado en el conducto raquídeo, da lugar a respuestas de generación y de ahorro de calor, consistentes, respectivamente, en el temblor y en la vasoconstricción periférica. El calentamiento de la médula espinal induce vasodilatación y, a veces, jadeo. La alteración de la temperatura de la médula espinal provoca también respuestas termorreguladoras en los mamíferos, lo que sugiere que la mayor diferencia entre los sistemas de temorregulación de las aves y de los mamíferos estriba en que el hipotálamo de los mamíferos controla directamente la temperatura interna del cuerpo, mientras que el de las aves recibe la mayor parte de información sobre el estado térmico del cuerpo procedente de receptores de temperatura situadas en la médula espinal, y quizás en otros puntos del cuerpo.

Los peces pueden también integrar en el hipotálamo la información térmica central y périferica, para controlar algunas respuestas fisiológicas. Debido a la alta conductividad térmica del agua y a la heterogeneidad térmica de muchas masas de agua, los peces experimentan a menudo cambios rápidos de su temperatura corporal. Estos cambios originan fluctuaciones en muchos parámetros vitales como, por ejemplo, en la intensidad de metabolismo. Aunque los mecanismos efectores de que dispone un pez no pueden proporcionarle una temperatura interna constante, pueden ser controlados para anticipar las modificaciones fisiológicas que acompañan de forma inevitable a los cambios térmicos. Por ejemplo, una subida de la temperatura corporal de un pez implica un aumento en su intensidad de metabolismo y, por tanto, en su demanda de oxígeno. El pez podría esperar hasta que sobreviniera un déficit de oxígeno y responder entonces aumentando la ventilación branquial, o bien podría utilizar sus facultades de sensibilidad térmica para informar de los futuros cambios en la demanda de oxígeno a los centros respiratorios. En este último caso se evitarían las alteraciones en la concentración de oxígeno de la sangre arterial, asegurando un suministro constante de este elemento a los tejidos.

Uno de nosotros (Crawshaw) estudió las respuestas respiratorias de los peces es-



REAJUSTE DEL TERMOSTATO durante la entrada en hibernación de la ardilla de manto dorado, demostrado mediante una serie de experimentos en los que se alteró la temperatura hipotálamica del animal. Los puntos indican las temperaturas reales del hipotálamo a tiempos específicos, durante este período. La manipulación de la temperatura del hipotálamo mostró que el umbral al que se da la respuesta de producción de calor metabólico se localizan dentro del margen señalado por la línea vertical sita bajo cada punto de temperatura hipotalámica. La entrada en hibernación implica un reajuste progresivo del termostato.



NEURONAS, O CELULAS NERVIOSAS, TERMOSENSIBLES han sido localizadas en el hipotálamo de los mamíferos mediante la implantación de electrodos de registro. Estas dos gráficas muestran la frecuencia de descarga de neuronas específicas en función de la temperatura del hipotálamo en un mamífero hibernante, el hámster dorado *(parte superior)* y en otro no hibernante, el cobayo *(parte inferior).* Las neuronas termosensibles del hámster responden dentro de un amplio margen de temperaturas corporales a las que serán sometidas durante la entrada en hibernación, mientras que las neuronas hipotalámicas del cobayo no generan ningún impulso a temperaturas inferiores a 30 grados C. (86 grados F.) Las experiencias que se muestran aquí fueron llevadas a cabo por Wolf Wünnenberg en la Universidad de Kiel.

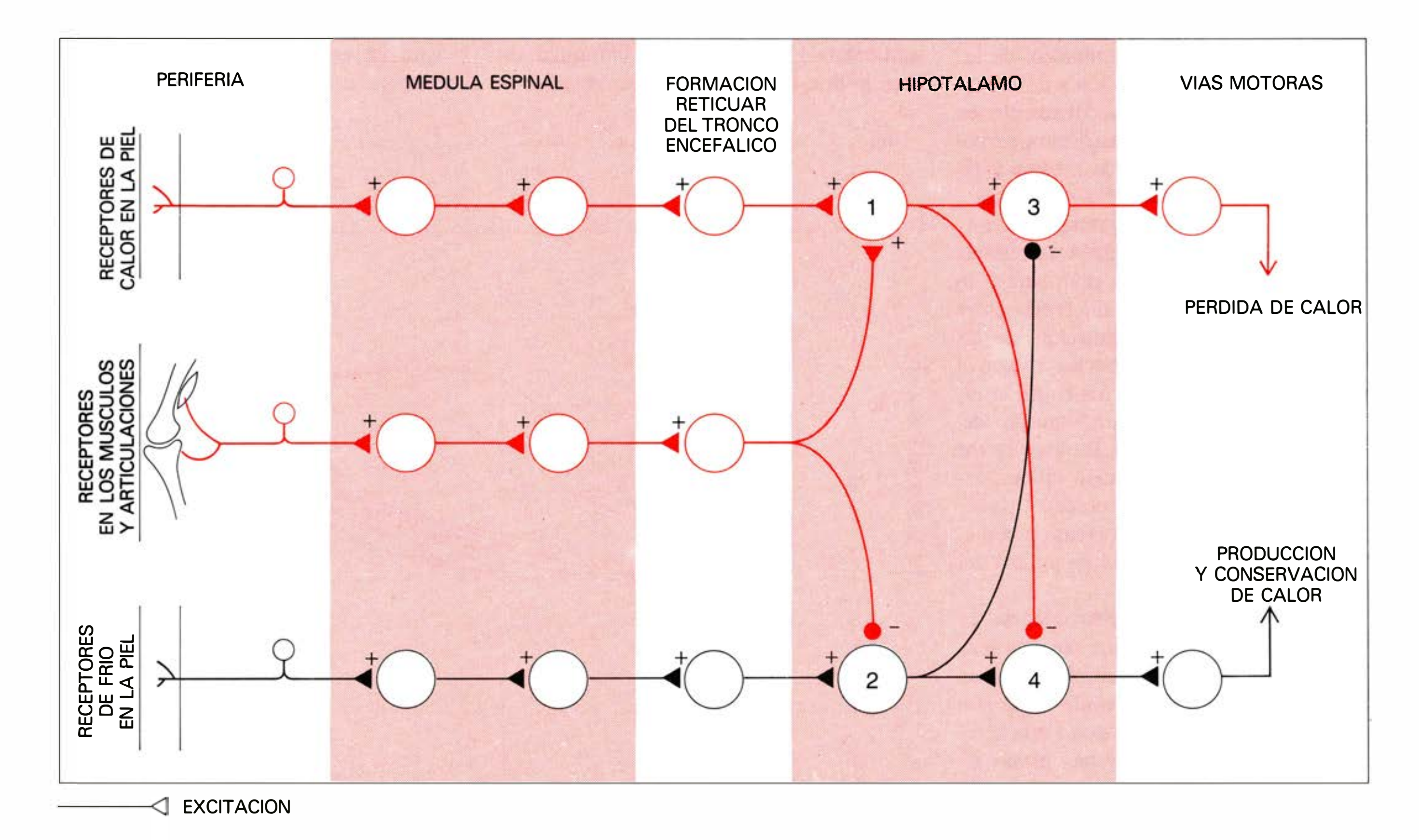
corpión al modificar la temperatura de su hipotálamo con la ayuda de termodos implantados. Al calentar el hipotálamo, el pez ventilaba más intensamente las branquias; mientras que al enfriarlo se produjo el efecto contrario. La ventilación branquial se reveló también dependiente de la información térmica periférica. Ante una subida rápida de la temperatura del agua, la carpa aumenta rápidamente su ventilación branquial manteniéndola a un nivel elevado por espacio de unos 30 segundos; después, la respuesta disminuye. Según parece, los peces utilizan, pues, tanto la información térmica central como la periférica para prever los cambios en la demanda de oxígeno. Este sistema regulador podría considerarse como un antecedente evolutivo del sistema de control fisiológico de los homeotermos, que mantiene la temperatura interna del cuerpo ajustada a los niveles óptimos.

Tomando como base lo que actualmente se conoce sobre las características del termostato de los vertebrados, se puede especular sobre su diseño neural. Las investigaciones neurofisiológicas han revelado la existencia de neuronas, o células nerviosas, en el hipotálamo que podrían considerarse componentes del termostato. Se han identificado dos poblaciones de neuronas termosensibles: una, que responde al calentamiento local y, la otra, al enfriamiento local del tejido cerebral. Las neuronas pertenecientes a la primera población aumentan la frecuencia de descarga de impulsos en proporción directa al grado de elevación de la temperatura hipotalámica sobre el valor corporal normal. De forma similar, las neuronas sensibles al enfriamiento responden intensificando la frecuencia de impulsos cuando la temperatura del hipotálamo es inferior a la normal. No se sabe todavía si estas neuronas hipotalámicas forman realmente parte del termostato central, pero esta suposición está sostenida por estudios que demuestran que estas neuronas responden en ocasiones a cambios en las temperaturas de la piel y de la médula espinal.

Wolf Wünnenberg y sus colaboradores de la Universidad de Kiel han demostrado que las neuronas termosensibles hipotalámicas de los mamíferos hibernantes difieren de las de los no hibernantes en su escala de sensibilidad térmica, lo cual resulta lógico si se presupone que estas neuronas forman realmente parte del termostato. Las neuronas del hipotálamo del animal no hibernante exhibieron sensibilidad a la temperatura sólo en un estrecho margen, y la mayoría permanecieron inactivas por debajo de los 30 grados C. (86 grados F.); sin embargo, muchas de las neuronas hipotalámicas del hibernante dieron curvas continuas de respuesta a la temperatura entre límites mucho más separados.

Un modelo sencillo propuesto por uno de nosotros (Hammel) sugiere la forma en que las neuronas del hipotálamo podrían estar interconectadas para lograr la regulación de la temperatura corporal. De acuerdo con el modelo, cuando la actividad relativa de las neuronas sensibles a la elevación térmica prevalece sobre las excitadas por el enfriamiento, se provoca la activación de los mecanismos de disipación de calor. A su vez, cuando se invierte esta relación de dominancia se estimulan las medidas para la generación y conservación de calor. Los umbrales del hipotálamo para la termorregulación quedan determinados por la actividad de las dos poblaciones de neuronas.

Como hemos podido ver, la temperatura corporal de un homeotermo perma-



EL MODELO TEORICO que aquí se esboza muestra cómo pueden estar interconectadas las neuronas del sistema nervioso central para dar lugar a un termostato funcional. Cada una de las cuatro poblaciones neuronales básicas, que se cree existen en el hipotálamo, se representa esquemáticamente por una sola neurona. Las poblaciones *1* y *2* son sensibles al calentamiento y al enfriamiento, respectivamente. Estas poblaciones termosensibles facilitan e inhiben a las poblaciones *3* y *4*, que sirven para desencadenar las acciones de termorregulación. Las frecuencias de descarga relativas de las poblaciones *1* y *2* determinan el valor de las temperaturas umbrales del hipotálamo a las que se dan las respuestas termorreguladoras específicas. Estos umbrales pueden ser influidos por señales nerviosas de diversa procedencia: las que se originan en los receptores periféricos de temperatura localizados en la piel, las señales que surgen de los receptores de la postura y movimiento de los músculos y articulaciones, señales que provienen de las neuronas termosensibles de la médula espinal y, finalmente, las señales que proceden de las neuronas (células nerviosas) de la formación reticular del tronco encefálico que controlan el sueño y la vigilia.

nece constante en la mayoría de situaciones: las respuestas termorreguladoras son desencadenadas por los cambios rápidos de la temperatura periférica. ¿Cómo integra el termostato central la información procedente de los termorreceptores de la piel? Una hipótesis consiste en aceptar que las terminaciones nerviosas de la piel, capaces de percibir estímulos de calor, aumentan su frecuencia de descarga de impulsos a medida que sube la temperatura del ambiente, y de esta forma excitan a las neuronas sensibles al calor. Las terminaciones nerviosas estimuladas por los descensos de temperatura podrían, de manera similar, inervar las neuronas centrales sensibles al frío. Por tanto, al pasar de una habitación templada a un ambiente más fresco, los receptores periféricos de frío podrían intensificar la descarga de las neuronas hipotalámicas sensibles al descenso térmico, desplazando el punto de intersección de esta población con la de las neuronas excitadas por el calor hacia temperaturas superiores. Como esta nueva intersección quedaría por encima de la temperatura de 37 °C, existente en el hipotálamo, el estímulo periférico de frío desencadenaría las respuestas de generación de calor sin necesidad de que variara la temperatura del hipotálamo. Este modelo sencillo puede explicar, en consecuencia, la capacidad de anticipación del termostato.

El hipotálamo recibe mucha información adicional además de la de los termoreceptores de la piel, y cualquier modelo detallado del termostato debe tener en cuenta la integración de las señales térmicas procedentes de la médula espinal y de las vísceras abdominales, la información derivada de los receptores de tensión de los músculos y articulaciones (que indica el grado de actividad física) y la de los impulsos provenientes de la formación reticular del tronco encefálico (que constituye parte importante del sistema de control nervioso sobre el grado de vigilia). Todas estas señales diversas son integradas por el hipotálamo y aportan información sobre la temperatura central del cuerpo y sobre los cambios más rápidos que acontecen en la superficie corporal.

El valor de los estudios comparados en gran variedad de especies de vertebrados, que se enfrentan a problemas térmicos muy diferentes y que utilizan diversas estrategias para resolverlos, estriba en que nos dan luz tanto sobre las características generales del sistema termorregulador de los vertebrados como sobre sus características específicas. La prosecución de las investigaciones debe permitirnos el proponer, poner a prueba y perfeccionar los modelos teóricos, para que constituyan un mejor reflejo del diseño real del termostato.

El problema de las tectitas

Estos peculiares trozos de vidrio, ¿se originaron en la Tierra o en la Luna? ¿Se debieron a la actividad volcánica o a los impactos meteoríticos? Los datos de que se dispone son contradictorios y la solución más razonable, sorprendente

John A. O'Keefe

Dispersos por muchos lugares del mundo se encuentran pequeños cantos vítreos con una curiosa configuración superficial y composición característica. A menudo se hallan en vastos "campos de dispersión" que se extienden por las masas continentales y por los mares y océanos que las separan (los testigos obtenidos por sondeo en los fondos oceánicos nos dan pruebas de ello). Estas tectitas, así llamadas a partir de la palabra griega *tektos* (fundido), son muy parecidas al vidrio volcánico obsidiana, pero su composición química difiere de la de cualquier lava terrestre; contienen mucha menos agua y carecen de los característicos microcristales que se encuentran en las obsidianas. Como el mineralogista austríaco Josef Mayer señaló ya en 1787, nadie ha encontrado la roca madre *(Mutterstein)* de un campo de tectitas. No pueden ser, por tanto, producto del volcanismo terrestre.

Muchos de los hallazgos más significativos relativos a las tectitas son negativos. Tal es el caso de la ausencia de una roca madre originaria. Contrariamente a las interpretaciones propuestas en ocasiones diversas, no se trata de objetos de vidrio realizados por el hombre, ni de restos de algún planeta antiguo, o trozos de antimateria, o fulguritas fundidas por rayos a partir de arenas terrestres. El conocimiento adquirido en época reciente sobre la superficie de la Luna confirma las primitivas suposiciones de que las tectitas no pueden ser fragmentos lunares, impulsados hacia la Tierra por el impacto de meteoritos sobre la Luna. Una cuidadosa evaluación de los datos recogidos durante los últimos cien años permite dos explicaciones posibles sobre el origen de las tectitas. De acuerdo con una de ellas, las tectitas son trozos de rocas sedimentarias terrestres, excavadas por los impactos de los meteoritos que llegan a la Tierra, fundidos por el calor desarrollado en el choque y solidificados en forma de vidrio al desplazarse por la atmósfera hasta los lugares, tan dispersos, en donde se les encuentra. La otra posibilidad es que las tectitas sean restos de erupciones de lava lanzadas hacia la Tierra por la actividad volcánica desarrollada en la Luna.

Si las tectitas son de origen terrestre, ello significa que existe algún tipo de proceso mediante el cual el suelo o las rocas más comunes pueden convertirse instantáneamente en un vidrio homogéneo, sin agua y sin burbujas, susceptible de ser impulsado a millares de kilómetros por encima de la atmósfera. Si las tectitas provienen de la Luna, es posible afirmar que existe como mínimo un volcán importante en alguna parte de la misma, que ha entrado en erupción hace por lo menos 750.000 años. Aunque ninguna de las dos posibilidades es fácil de aceptar, hay que optar forzosamente por una; lo mejor será elegir la más razonable, rechazando la más improbable.

En 1975, P. V. Florensky, del Instituto de Geología de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, anunció el descubrimiento de tectitas junto a la estructura de Zhamanshin, cráter de poca profundidad, cercano a la ciudad de Irgiz en el Kazakhstan. Las llamó irghizitas, siguiendo la costumbre de denominar los grupos de tectitas con el nombre del lugar donde son halladas. Este descubrimiento, el más importante en 25 años, ha demostrado ya tener gran valor instructivo. El cráter donde se encontraron las irghizitas forma una depresión de poca profundidad, de unos cinco kilómetros de diámetro. Según Florensky, está rellenado por un espesor de 100 a 150 metros de sedimentos lacustres que descansan sobre un substrato de rocas fracturadas. El cráter proporciona sólidas pruebas que demuestran un impacto por un objeto procedente del espacio. Según Yu P. Dikov, colega de Florensky, algunas de las rocas locales han recibido impactos que han producido los vidrios coesita y stishovita, que son formas de elevada presión de la sílice (dióxido de silicio, SiO_2). Esa estrecha asociación de tectitas y cráter de impacto no es única, pues existen otros ejemplos, como las tectitas de Aouelloul, en Mauritania, y quizás el "vidrio de Darwin" de Tasmania.

O bien las tectitas hicieron el cráter de Zhamanshin o el cráter fue el que produjo las tectitas. Un gran bloque de vidrio de tipo tectita procedente del espacio pudo haber excavado el cráter, desintegrándose para formar las irghizitas. La otra alternativa es que un meteorito pudo haber aterrizado en el lugar formando el cráter y transformando al mismo tiempo parte de las rocas locales en un vidrio de tipo tectita, eliminando quizá, debido a la elevada temperatura, alguno de sus constituyentes más volátiles. Las dos hipótesis están siendo examinadas por investigadores de la Unión Sovietica y de los Estados Unidos, que están llevando a cabo un programa conjunto (el Instituto de Geología ha prestado muestras de ellas a laboratorios de Estados Unidos) de comparación de las tectitas con las formaciones litológicas locales y con las tectitas de otros lugares.

Las irghizitas son pequeños objetos de color negro, con un peso medio de medio gramo aproximadamente, aunque la mayoría pesan varios gramos. Se trata de objetos vesiculares y contorsionados que se parecen a los vidrios tectíticos de Aouelloul y de Darwin por su forma. Según Kurt Fredriksson, de la Smithsonian Institution, su composición química es notablemente uniforme de una muestra a otra; difiere, a su vez, de la composición de todas las formaciones litológicas locales, y resulta muy afín a la de las tectitas de Java. El parecido con las javanitas se hace extensivo igualmente a los elementos traza, según han indicado Yu. F. Pogrebnyak, de la Unión Soviética, y William D. Ehmann, John A. Philpotts, C. S. Annell, John W. Morgan y otros investigadores, de los Estados Unidos. Como todas las demás tectitas, las irghizitas son vidrios

homogéneos, desprovistos incluso de pequeños cristales. A primera vista, los datos son contradictorios. Los estudios sobre su composición parecen apoyar la idea de un origen extraterrestre, pero, después de examinar las muestras, Florensky ha aceptado la hipótesis del impacto meteorítico.

Las observaciones definitivas, relativas a este nuevo descubrimiento tendrán que ajustarse a un conjunto de hechos y cálculos acumulados a lo largo de los años. Las javanitas son miembros de una nutrida familia de tectitas (existen, quizá, 100 millones de toneladas) que cayeron hará unos 750.000 años sobre el océano Indico, sur de China, sureste de Asia, Indonesia, Filipinas y Australia. La extensión de este campo de dispersión australo-asiático ha sido determinada por el descubrimiento de tectitas en un lugar tras otro, desde que una muestra de una de sus formas más significativas fue entregada a Charles Darwin durante la expedición del *Beagle.* Las tectitas se han datado en 750.000 años mediante análisis de isótopos (determinando las proporciones de potasio 40 y de argon 40. Este último es el resultado de la desintegración radiactiva del primero), por análisis de las trazas de fisión (contando la trazas dejadas por la fisión natural del uranio) y por la presencia de microtectitas en los testigos del fondo oceánico en niveles asociados con determinadas inversiones del campo magnético de la tierra y en correspondencia con microfósiles marinos particulares. (Los intentos de datar ejemplares encontrados en tierra firme por métodos estratigráficos han dado resultados



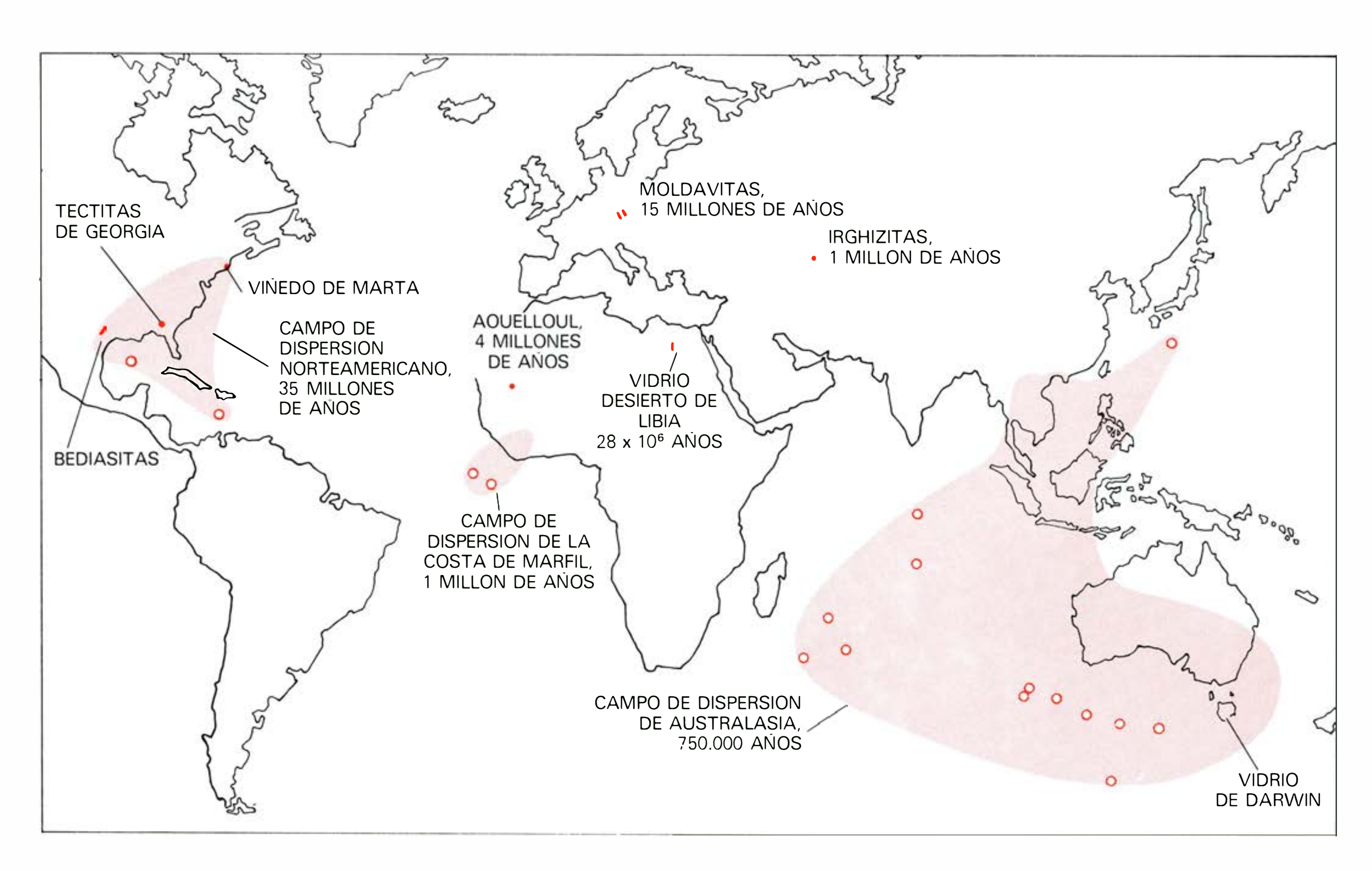
EJEMPLAR DE MOLDAVITA (tectita procedente de Checoslovaquia) que muestra su brillo en una fotografía realizada por Joseph Walters, del Goddard Space Flight Center, de la National Aeronautics and Space Administration. Las moldavitas se encuentran en "campos de dispersión" adyacentes de Moravia y Bohemia; deben su nombre al río Moldau. Este ejemplar, procedente de Koroseky (Bohemia), cuyo diámetro es de unos 40 milímetros, tiene el color verde de las tectitas de Bohemia. Se creía que las moldavitas eran trozos de vidrio artificial, porque está región se dedicaba a la fabricación del vidrio.

incoherentes, incluso cuando han sido realizados por geólogos muy preparados. Lo cual se debe, en mi opinión, a la dificultad intrínseca de utilizar la estratigrafía para datar acontecimientos muy recientes.)

A diferencia de las tectitas contorsionadas que se han descubierto en los cráteres de impacto, las tectitas de Australasia son objetos redondeados y macizos, a menudo en forma de lágrima, de pesa o de disco, que muestran pocas señales de deformación interna. La mayoría guardan un estrecho parecido en cuanto a composición y existen subgrupos cuyos ejemplares presentan una composición química idéntica, formando, en los lugares donde han sido descubiertas, bandas alargadas dentro del campo en que se encuentran. Las tectitas se distinguen siempre, químicamente, de la gran diversidad de rocas sobre las que han sido halladas. Todo ello nos pone de manifiesto que las tectitas de los campos de dispersión de Australasia se originaron en un punto único, ya sea en el espacio o en la Tierra. Debieron ser lanzadas por algún mecanismo desde dicho punto inicial hasta los dispersos lugares de la tierra donde se encuentran. La investigación relativa a su origen comporta, por tanto, la búsqueda de un mecanismo de lanzamiento capaz de extender este gigantesco enjambre sobre un área cuya dimensión mayor es de unos 11.000 kilómetros y cuya extensión es, quizá, de una décima parte de la superficie terrestre.

Podemos aplicar consideraciones parecidas a otros dos vastos campos de tectitas, de los cuales el mayor es el de América del Norte. Se trata del más antiguo conocido, con una edad de 35 millones de años, y que debió tener una masa de mil millones de toneladas, la mayor parte de la cual ha sido erosionada y barrida desde entonces. Cuando se formó el campo se extendía, como mínimo, desde la costa meridional de los Estados Unidos, por todo el Golfo de México y el mar Caribe, hasta un punto cercano a Caracas, en Venezuela. El campo de dispersión de la Costa de Marfil, de un millón de años de antigüedad, se adentra desde el citado país hacia el Atlántico meridional y tiene una masa de unos 10 millones de toneladas. En cada uno de estos vastos campos, las tectitas mantienen una forma parecida a las de Australasia y difieren morfológicamente de las irghizitas. Existen varios campos de dimensiones menores y hallazgos individuales.

Hasta aquí hemos visto la extensión global de los campos. Voy a resumir ahora el tipo de razonamiento que, en última instancia, llevó a las dos posibilidades que apunté al principio de este artículo. Harold C. Urey, de la Universidad de California en San Diego, ha señalado que las dimensiones de los campos de dispersión demuestran que las tectitas no provienen del espacio existente más allá de la Luna. Una nube de objetos separados que se aproximara a la Tierra desde el espacio, llegaría a ser tan grande y difusa (debido a los efectos diferenciales de la atracción solar) que cubriría necesariamente un hemisferio entero de la Tierra, tal como ocurre con una lluvia meteórica. Por otro lado, la desintegración en la atmósfera terrestre de un solo elemento proporcionaría una distribución demasiado pequeña (unas pocas decenas de kilómetros de longitud máxima), tal como ocurre en la caída de un meteorito. El análisis de las tectitas proporciona aún más pruebas en contra de la teoría de una nube de elementos en el espacio; ellas carecen de las señales que suelen acompañar a la interacción espacial con los rayos cósmicos primarios: la presencia de neon 21, aluminio 26 o berilio 10, o la característica forma en *V* de las trazas de los rayos cósmicos puestas de manifiesto mediante ataque con ácido. Así pues, el origen de las tectitas



LA DISTRIBUCION DE LAS TECTITAS no es casual. Se concentran en unos pocos campos de dispersión de grandes dimensiones *(color claro)* y en grupos más pequeños o en localidades puntuales *(rayas de color o puntos)*. Se han encontrado microtectitas en testigos obtenidos en zonas oceánicas profundas *(círculos vacíos)* que ayudan a establecer la extensión de los campos importantes. En la ilustración aparecen las edades de las tectitas de cada grupo.

deberá buscarse en la Tierra o en la Luna.

Los únicos mecanismos que podemos considerar capaces de proporcionar las velocidades de lanzamiento necesarias son: el volcanismo y el impacto meteorítico. Los vientos no pueden ser responsables de ello porque hasta las mismas microtectitas, de tamaño milimétrico, caerían en unos pocos minutos, lo cual implica un viaje de duración demasiado corta para explicar siquiera un campo de dispersión modesto. El hombre puede cambiar de sitio las tectitas, pero es imposible que haya actuado sobre centenares de millones de toneladas y, en todo caso, no las hubiera trasladado en medio del océano Indico hace 750.000 años. Tenemos, pues, dos mecanismos de lanzamiento plausibles y la localización de dos posibles fuentes de origen; por consiguiente, existen cuatro alternativas a considerar: volcanismo terrestre, volcanismo lunar, impacto de meteoritos en la Tierra e impacto de meteoritos en la Luna.

De esos cuatro orígenes posibles, uno quedó descartado hace tiempo. Se trata del volcanismo terrestre. Hay dos razones contra el mismo. La primera, a la que aludí anteriormente, es que la composición química de las tectitas no es igual a la de los vidrios producidos por el volcanismo terrestre. Una tectita típica tiene un contenido en sílice algo superior al 68 por ciento, mientras que un vidrio volcánico con un contenido tan elevado en sílice se considera como granítico. Existen vidrios graníticos terrestres, pero tienen una composición que puede representarse por la abundancia relativa, en cantidades casi iguales, de tres minerales: cuarzo (SiO_2, considerado como mineral), feldespato sódico ($NaAlSi_3O_8$) y el feldespato potásico ($KAlSi_3O_8$). Fuera de éstos, el resto de minerales no representa más del 20 por ciento.

El motivo es obvio: para los silicatos esta composición es el eutéctico ternario (triple), es decir, que cristaliza a la temperatura más baja. Cuando un magma algo basáltico se enfría, cristalizan diversos minerales y cada uno de ellos lo hace a una temperatura y con una composición característica hasta que la masa fundida alcanza dicha composición eutéctica. En ese momento, la fase líquida tiene la composición de un granito. Si de algún modo el líquido se separa de los cristales, puede ser intruido enfriándose lentamente para formar una roca cristalina (granito) o puede ser expulsado por una erupción, enfriándose instantáneamente para dar un vidrio granítico (como la obsidiana). Como ejemplo tenemos el "granito común", conocido con las siglas G–1, cuya composición mineral equivale a un 29 por ciento de cuarzo, 32 por ciento de feldespato sódico y un 28 por ciento de feldespato potásico, mientras que el 11 por ciento restante contiene otros minerales.

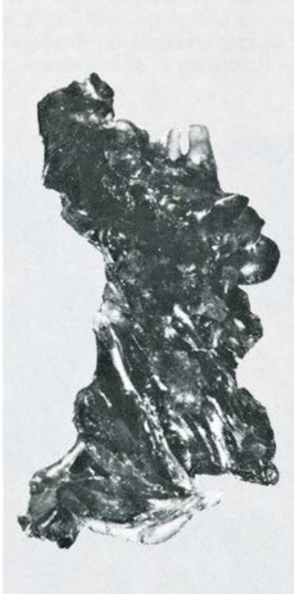
No ocurre así en las tectitas. Sus proporciones minerales equivalentes son, típica y aproximadamente, de un 40 por ciento de cuarzo, 13 por ciento de feldespato sódico y 15 por ciento de feldespato potásico; constituido el 32 por ciento restante por otros minerales. Expresándolo de forma distinta, puede decirse que las tectitas contienen más óxidos divalentes –óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y óxido ferroso (FeO)– que las rocas terrestres que poseen un contenido en sílice similar, y menos óxidos monovalentes –óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O)– que estas mismas rocas.

La segunda razón que destruye la hipótesis de que las tectitas provengan de volcanes terrestres es que éstos no pueden proporcionar una velocidad suficiente. La energía que los acciona es el vapor, y a la temperatura de una lava (no superior a 1200 grados Celsius), la velocidad del sonido en él es aproximadamente de un kilómetro por segundo. La teoría termodinámica demuestra que el escape de gas de un recinto cerrado está condicionado por la existencia de una velocidad límite cuyo valor es aproximadamente dos veces la velocidad del sonido en dicho gas, o sea, alrededor de dos kilómetros por segundo para el vapor. (Temperaturas más elevadas permitirían velocidades más altas, pero la temperatura de una lava es limitada, toda vez que ésta debe estar contenida en un crisol de roca. Si la temperatura se eleva

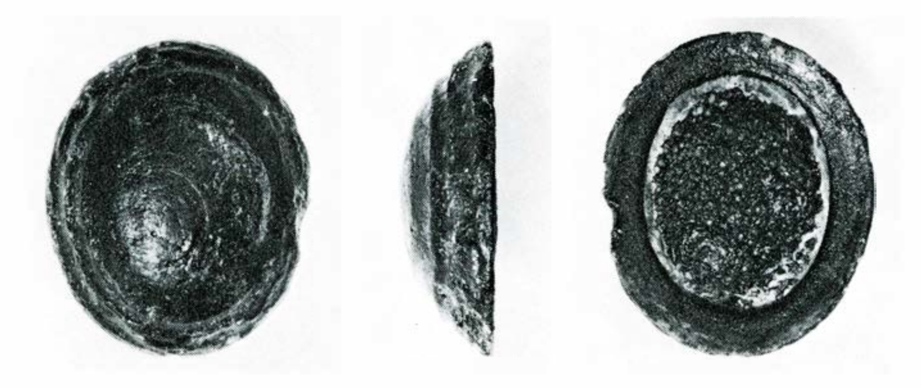




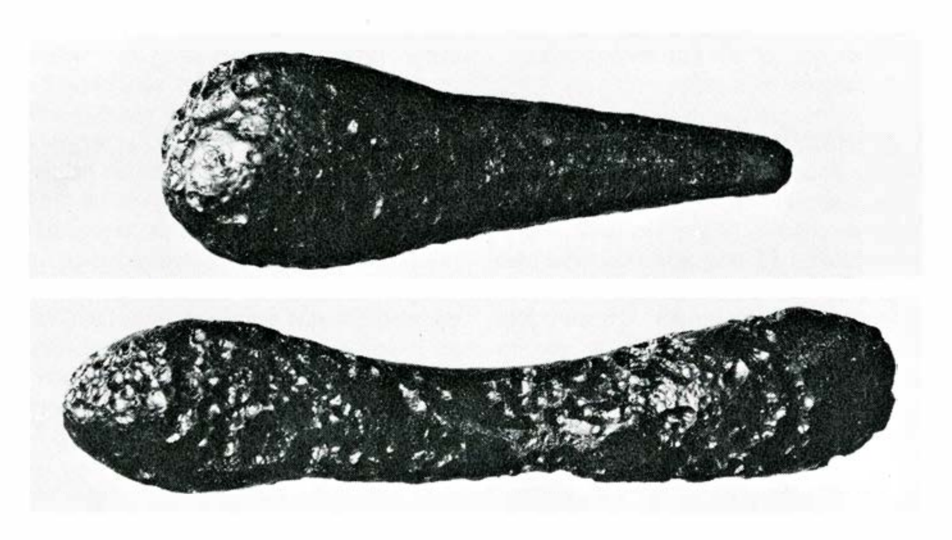
IRGHIZITAS halladas en el Kazakhstán (Unión Soviética). Se trata de las tectitas descubiertas en época más reciente. Estos ejemplares, de longitudes comprendidas entre unos 20 y 28 milímetros (de dos de ellos se arrancaron unos trozos para proceder a su análisis) se pusieron a disposición de los investigadores americanos por el Instituto soviético de Geología a través de P. V. Florensky, quien las citó por vez primera.

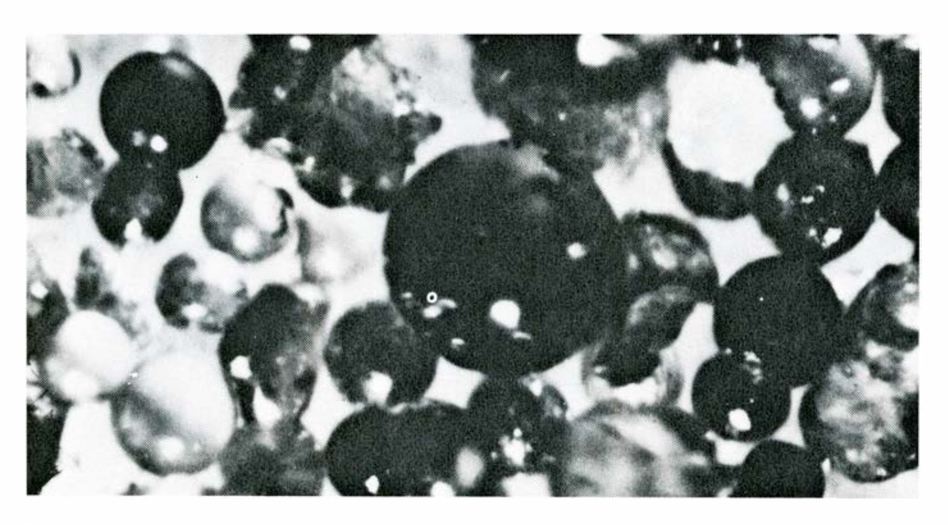

LA ESTRUCTURA CONTORSIONADA de muchas irghizitas (como las de la fotografía de la parte superior de esta página) se parece a la de algunas tectitas tipo "vidrio de Darwin", procedentes de Tasmania *(izquierda y centro)* y a la de las tectitas de Aouelloul, de Mauritania *(derecha)*. Las tectitas de Aouelloul, igual que las irghizitas, están asociadas con un cráter de impacto cercano y lo mismo ocurre con el vidrio de Darwin. Estos ejemplares de longitudes comprendidas entre 50 y 60 mm fueron recogidos por R. F. Fudali.



AUSTRALITA, tectita procedente de Australia y recogida por Charles Darwin durante el viaje del *Beagle* (actualmente se encuentra en el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres). Puede observarse frontalmente *(izquierda)*, lateralmente *(en medio)* y desde la parte posterior *(derecha)*, siendo su dimensión mayor algo superior a 25 milímetros. Su curiosa forma de rueda de tren se debe a la ablación aerodinámica.



LAS TECTITAS en forma de lágrima y de pesa típica son debidas a "salpicaduras", que hacen pensar en gotas solidificadas de un líquido viscoso. Estas tectitas procedentes de Tailandia se encuentran en la Smithsonian Institution. La de forma de pesa tiene una longitud de unos 115 milímetros. Se cree que la forma de estas tectitas deriva de la ruptura producida en un chorro fundido de mayores dimensiones. La mayoría de las tectitas de esta clase poseen una masa mayor que la de las irghizitas y que otras asociadas a cráteres de impacto. Su forma sugiere un control producido por la tensión superficial, lo cual implica un medio en el que casi no actúa esfuerzo alguno durante el enfriamiento. Quizás empezaron a dar vueltas al entrar en la atmósfera, de modo que la ablación no se concentró en un solo lado como en las australitas.

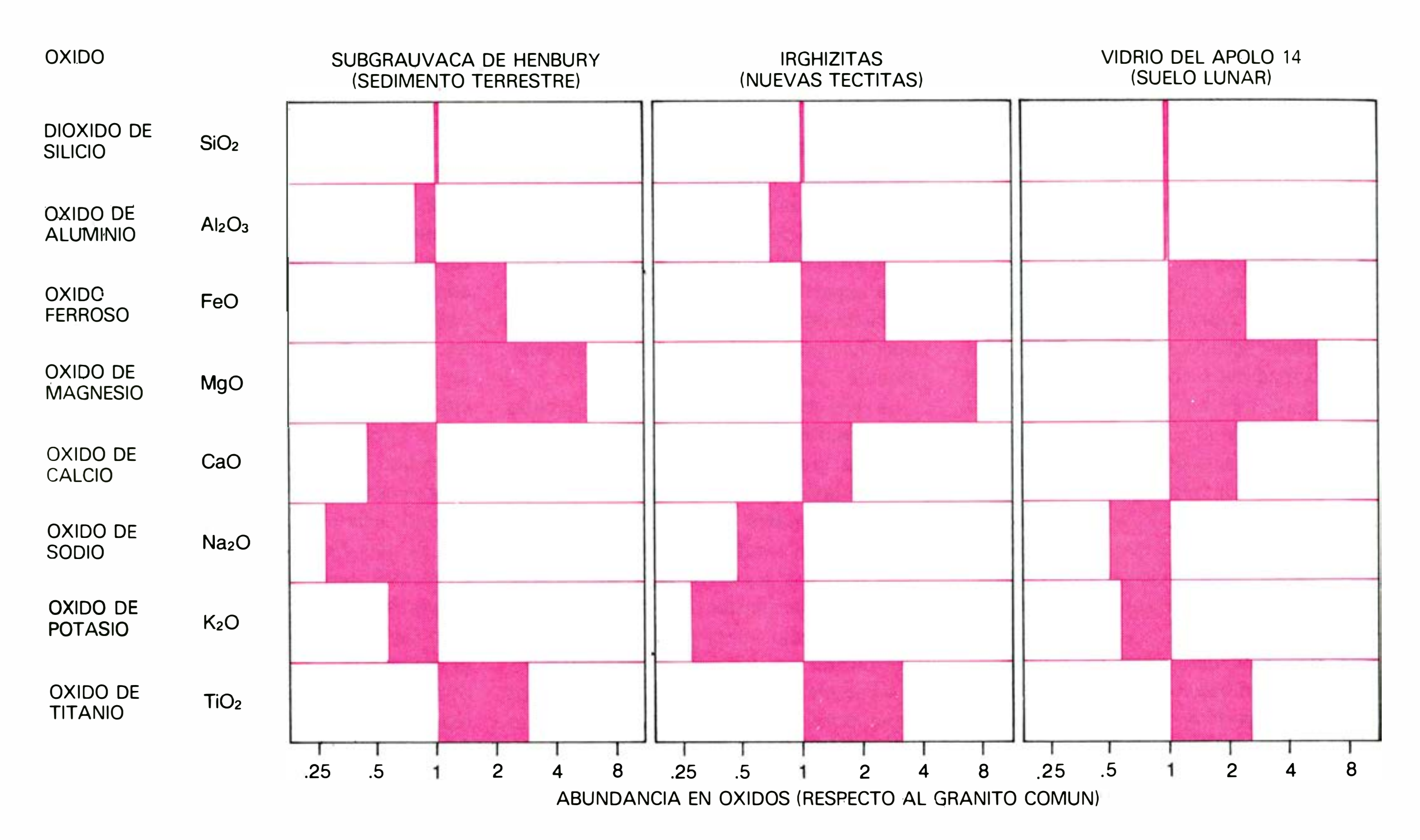


MICROTECTITAS, descubiertas por Billy P. Glass de la Universidad de Delaware y sus colaboradores en un testigo de sondeo procedente del fondo del mar Caribe, cerca de la isla de Curaçao. Su composición concuerda con la de las tectitas del campo de dispersión norteamericano. Los datos suministrados por la estratigrafía y las trazas de fisión permiten datarlas como del Eoceno superior, hace unos 35 millones de años. El tamaño real de la gran microtectita obscura *(que aparece en el centro)* es de 0,25 milímetros.

muy por encima del punto de fusión de la roca, las paredes se fundirán enfriando la lava.) La máxima "velocidad de salida" observada realmente en objetos expulsados de los volcanes es de solamente unos 700 metros por segundo. Con todo, la velocidad requerida para alcanzar los bordes del campo de dispersión de Australasia, desde un punto situado en el centro del mismo, sería algo superior a los seis kilómetros por segundo. El argumento de la composición y el déficit en la velocidad de lanzamiento justifican, ciertamente, que se elimine a los volcanes terrestres como fuente original de las tectitas.

Una de las tres posibilidades restantes, el impacto de meteoritos sobre la Luna, parece haber sido descartada gracias a los datos químicos recogidos por los alunizajes de las naves Apolo, Surveyor y Luna, y por los obtenidos mediante sensores remotos que han explorado gran parte de la superficie lunar. Parece claro que una gran parte de la superficie está formada por alguno de los distintos tipos de roca basáltica existentes, cuyo contenido en sílice es inferior al 55 por ciento. Los maria ("mares") de la Luna tienen basaltos ricos en hierro, y las tierras altas (highlands) basaltos ricos en feldespatos. Las rocas graníticas se encuentran sólo en forma de fragmentos (entre los que se hallan los vítreos) en los suelos y en algunas brechas (rocas formadas por fragmentos cementados entre sí). De ello se deduce que las masas graníticas existen realmente pero que, o bien deben ser de dimensiones reducidas o tienen que ocupar áreas limitadas que no han sido todavía observadas. Casi todo el suelo de la superficie lunar, así como las rocas que la integran, son de naturaleza basáltica y no pudieron constituir la materia original de las tectitas.

Siendo ése el caso, parece que debieran eliminarse los impactos sobre la superficie lunar como fuente de las tectitas, ya que el impacto es un proceso no selectivo: un objeto procedente del espacio puede aterrizar tanto en un sitio como en otro. Es verdad que las rocas lunares proyectadas hacia la Tierra por impactos meteoríticos estarían sujetas a determinadas acciones filtrantes, favorecedoras de los vidrios graníticos (que sobrevivirían al choque, entrarían en la atmósfera terrestre y se meteorizarían mejor que los basaltos), pero las diferencias no parecen lo suficientemente grandes como para explicar la naturaleza silícea de las tectitas. En realidad, los hallazgos de microtectitas con bajo contenido en sílice indican que el material pobre en sílice puede superar todos estos riesgos. (Incluso estas microtectitas son distintas de los balsatos lunares.)



TECTITAS, VIDRIO LUNAR Y ARENISCA guardan un extraordinario parecido, en lo que se refiere a su composición en elementos principales. Las barras indican las diferencias, entre estos tres materiales y el granito común (G-1), en contenido de sus óxidos más importantes. La composición tectítica se aproxima más al vidrio lunar representado (partículas vítreas obtenidas por el *Apolo 14*) que a la subgrauvaca de Henbury, que es una arenisca terrestre.

Pero no sólo las tectitas son distintas de los basaltos lunares, sino que también lo son los meteoritos. Se suponía que algunos meteoritos llegados a la Tierra habían sido despedidos de la superficie lunar tras un impacto producido sobre nuestro satélite. Edward Anders, de la Universidad de Chicago, y sus colaboradores notaron, sin embargo, que los principales tipos de rocas lunares que han sido estudiados difieren de cualquier meteorito encontrado en la Tierra. Según ellos, de ahí podía deducirse que un impacto meteorítico no puede lanzar materia de un objeto del sistema solar (tanto si se trata de la Luna, un planeta o un asteroide) a una velocidad tan alta como la velocidad de escape de la Luna, que es de 2,5 kilómetros por segundo. Este límite de 2,5 kilómetros, al que llamaré límite de Anders, se ha convertido en la piedra angular de las teorías sobre meteoritos aparecidas después del programa Apolo. Significa que los meteoritos no pueden originarse en Marte o en Mercurio. Implica, también, que no pueden ser despedidos directamente desde un asteroide, perteneciente al cinturón que forman estos objetos, hacia la Tierra. Si bien la velocidad inicial necesaria para que puedan abandonar un pequeño asteroide es en realidad insignificante, el cambio de velocidad requerido para que el material procedente de los asteroides se sitúe en una órbita que corte a la tierra debería ser de unos cinco kilómetros por segundo. Y el límite de Anders es ciertamente un argumento más, y definitivo, contra el impacto meteorítico sobre la Luna como origen de las tectitas.

Sin embargo, la lógica no se detiene aquí. Debemos tener en cuenta que el límite de Anders excluye también, de forma incluso más drástica, la posibilidad de que las tectitas se originen a partir de impactos meteoríticos terrestres. Se necesitan velocidades de cuatro a seis kilómetros por segundo para explicar la extensión geográfica de los enormes campos de dispersión, aun prescindiendo de la resistencia atmosférica.

La eliminación de las dos hipótesis por impacto resulta sorprendente. En la década 1960-70 casi todos los investigadores estaban convencidos (como era mi caso) de que las tectitas se generaban por impacto, ya fuera en la Luna o en la Tierra. Nos había ganado el descubrimiento realizado por Edward C. T. Chao, del Geological Survey de los Estados Unidos, de esférulas de níquel-hierro en determinadas tectitas. El níquel-hierro es un componente característico de los meteoritos, y este tipo de esférulas se encuentran en vidrios no tectíticos formados por impacto meteorítico. Las esférulas constituyen una prueba eficaz contra el volcanismo terrestre, ya que la presencia de hierro no oxidado es rara en las lavas. Dada la frecuencia relativa de las esférulas de níquel-hierro en las muestras lunares del Apolo, se hace difícil explicar que, si las esférulas están asociadas a impactos lunares, sean en realidad tan raras. Y con la ventaja de ese dato parece extraño que tiendan a estar asociadas con un tipo particular de vidrio tectítico y que su contenido en níquel sea bajo, mucho más bajo que el de los meteoritos. Cuesta conciliar el bajo contenido en níquel con un origen terrestre, y ello por una razón especial. Robin Brett, del Geological Survey, ha señalado que la pérdida parcial de hierro que sufre una esférula en un vidrio de impacto terrestre por oxidación produce generalmente una esférula con un contenido muy elevado en níquel (y con un halo rico en hierro a su alrededor que no se presenta en las tectitas). En las muestras recogidas por la nave Apolo hay pruebas de que algunas esférulas con contenido bajo en níquel se han originado en el interior de la Luna. Quizá las esférulas de las tectitas nos indican realmente un origen lunar y volcánico.

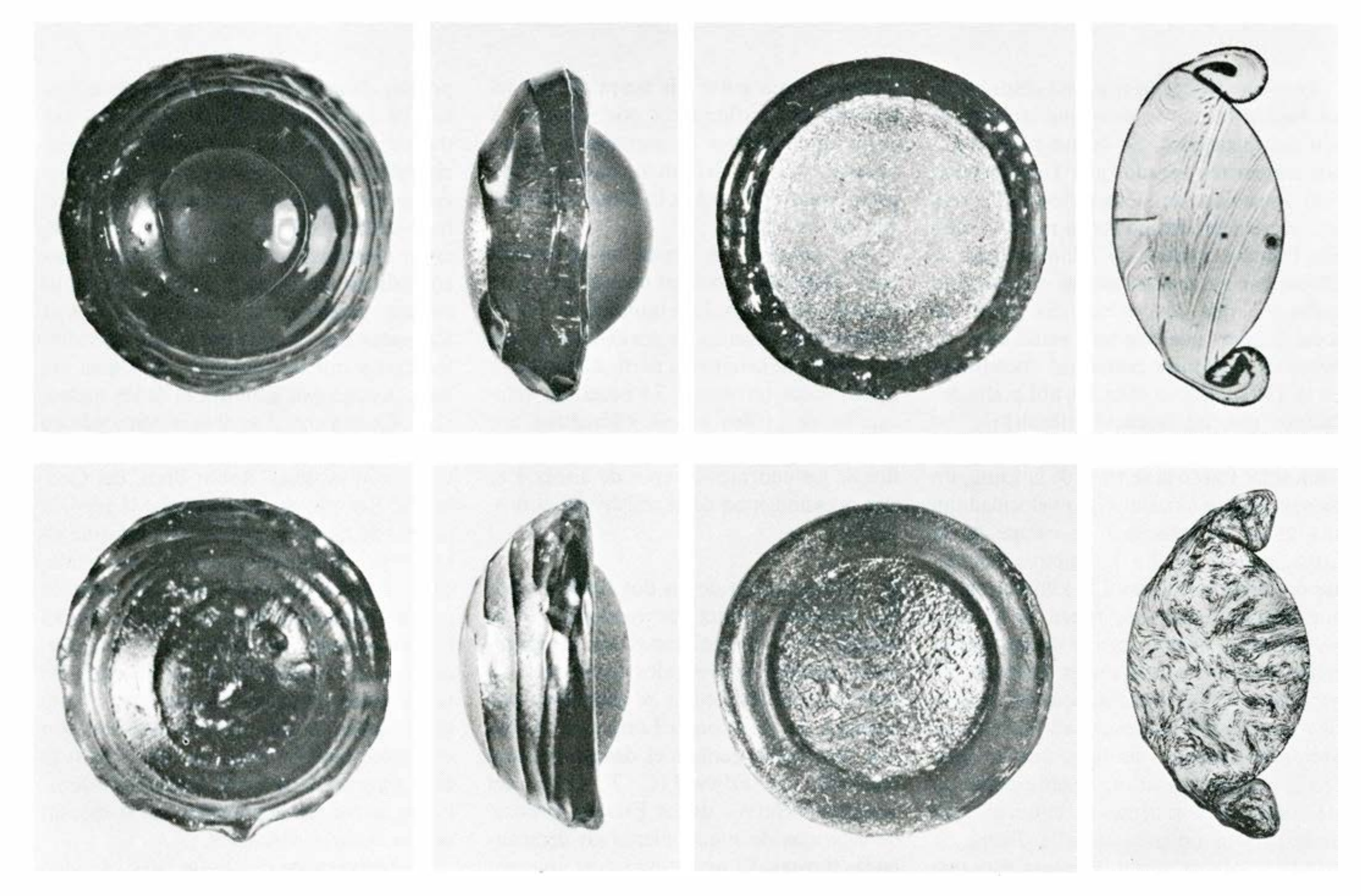
La hipótesis de que las tectitas han sido lanzadas a la Tierra por un volcán lunar presenta varios aspectos de interés. En primer lugar, es una respuesta al argumento de la falta de velocidad que des-

truye tanto el volcanismo terrestre como el impacto meteorítico lunar y (en mi opinión) el terrestre. Las rocas de la Luna son tan ávidas de oxígeno, es decir, tan "reductoras", que parece probable que un volcán lunar funcione con hidrógeno en vez de hacerlo con vapor. En concreto, se puede decir que la relación de equilibrio hidrógeno-vapor en contacto con el basalto lunar (o vidrio tectítico) a 1200 grados Celsius debería ser de cuatro a uno. La velocidad del sonido en esta mezcla de gases es de tres kilómetros por segundo. Partículas con velocidades de hasta seis kilómetros por segundo resultan, en principio, posibles. La velocidad de escape de la Luna es de sólo 2,5 kilómetros por segundo. Un volcán que operase con hidrógeno debería poder alcanzar esta velocidad, especialmente en ausencia de atmósfera.

La hipótesis del volcanismo lunar es compatible también con el descubrimiento de que la superficie lunar es primordialmente basáltica, lo cual elimina el impacto lunar como origen de las tectitas, ya que éstas son de composición típicamente silícea. El tipo de volcanismo explosivo, requerido para lanzar las tectitas, va asociado (por lo menos en la Tierra) a volcanes silíceos. Si las tectitas son impulsadas por el volcanismo lunar, parece razonable que debieran tener una composición predominantemente silícea: no se originaron en la superficie lunar sino en un magma granítico localizado en algún punto bajo dicha superficie, y hay pruebas de la existencia de estos magmas a pesar de que la superficie lunar está constituida, casi enteramente, por basalto.

La hipótesis del origen de las tectitas por impactos meteoríticos sobre la Tierra continúa gozando de gran aceptación, a pesar de las implicaciones que comporta el límite de Anders. Supongamos que mi aplicación del límite a la hipótesis del impacto terrestre sea errónea, y admitamos, por tanto, que existen dos serias posibilidades para explicar el origen de las tectitas: volcanismo lunar e impacto terrestre. El siguiente paso consistirá en examinar ambas posibilidades a la luz de datos más concretos relativos a la composición de las tectitas.

Los partidarios del impacto terrestre suponen que éste se produjo sobre rocas sedimentarias (quizá metamórficas), ya que las objeciones de tipo químico aducidas contra los vidrios volcánicos valen también para las rocas ígneas en general. Debido a una desgraciada coincidencia, las rocas sedimentarias terrestres y una fuente volcánica lunar son prácticamente capaces, por igual, de proporcionar la composición global de elementos que se observa en las tectitas. Entre los sedimentos terrestres, las areniscas, y en particular las rocas subgrauvacas, son las más parecidas a esta composición, ya que determinados procesos de clasificación han hecho aumentar su contenido en cuarzo. El cuarzo es dióxido de silicio puro y, puesto que no tiene planos de exfoliación naturales, es más resistente que otros minerales corrientes, tendiendo a formar granos de mayores dimensiones. Todo tipo de proceso clasificador que respete el tamaño de grano, tenderá a separar el cuarzo de los otros minerales. El elevado contenido en óxido de calcio, óxido magnésico y óxido ferroso comparado con el de óxido de sodio y óxido de potasio (que se observa en las tectitas y las distingue de los vidrios graníticos) es significativo sólo en rocas



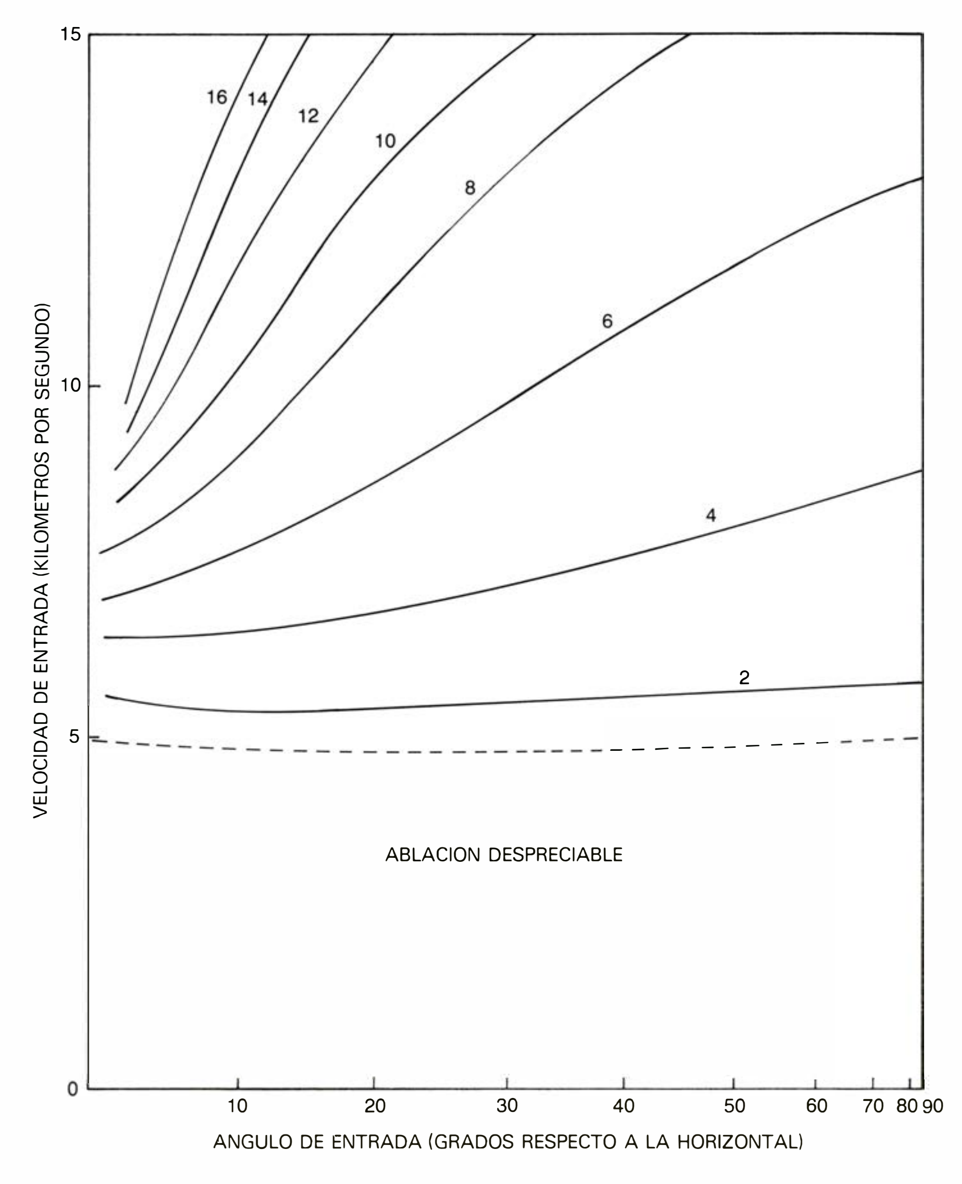
ABLACION DE LAS AUSTRALITAS, reproducida en el laboratorio por Dean R. Chapman, del Ames Research Center de la NASA. Sometió un vidrio tectítico artificial a una corriente de aire calentada en un chorro en arco produciendo los modelos que se observan en la parte superior, vistos en posición frontal, lateral y posterior *(de izquierda a derecha)* **y en sección delgada vistos lateralmente. En la parte inferior se observan australitas naturales. Las estrías de las secciones delgadas cortan la superficie posterior en ángulo agudo; pero en la superficie frontal giran y quedan contenidas en ellas como resultado del flujo.**

con elevado contenido en sílice; por contra, en las rocas de tipo intermedio o básicas (basálticas) es lo normal. Así pues, lo único que se necesita para que una roca terrestre alcance la composición global en elementos de las tectitas, es que aumente el contenido en sílice de la roca, quedando todo lo demás igual que en rocas más básicas. Los procesos sedimentarios pueden hacer precisamente esto.

Tal fue, por encima de cualquier otro considerando, lo que llevó a los geoquímicos a abogar por un origen terrestre de las tectitas durante la década de 1960-70. Creían que en la Luna no se formaba probablemente granito (la realidad es que no se forma mucho). Suponían que, de originarse granito en ella, tendría que ser muy parecido al granito terrestre, ya que las leyes de evolución de los magmas deberían ser iguales en ambos sitios. Y, naturalmente, no existirían en la Luna unos procesos sedimentarios que dieran un granito con la composición tectítica típica.

Ahora se han descubierto varias composiciones graníticas distintas en la Luna, y ninguna de ellas tiene las características de los tipos terrestres. En el lugar del alunizaje del *Apolo 14* el suelo, muy fino, está contituido en un 1 por ciento por vidrio rico en sílice. La mayor parte del mismo es igualmente rico en óxido potásico y, por tanto, difiere absolutamente de las tectitas conocidas. La razón de ello puede residir en el hecho de que las tectitas ricas en potasio no son duraderas debido a su rápida destrucción por meteorización. Sin embargo, una parte significativa (de un 10 a un 20 por ciento) del vidrio granítico lunar tiene únicamente cantidades moderadas de óxido potásico. Billy P. Glass, de la Universidad de Delaware, identificó algunas partículas de suelo vítreas, procedentes del *Apolo 14*, muy parecidas a las tectitas conocidas en lo concerniente a sus elementos principales. Estas partículas presentan en particular la doble característica de exceso en óxidos divalentes de calcio, magnesio y hierro y deficiencia en óxidos monovalentes de potasio y sodio. Se han observado partículas parecidas en el material procedente del *Apolo 12* y del *Apolo 15*.

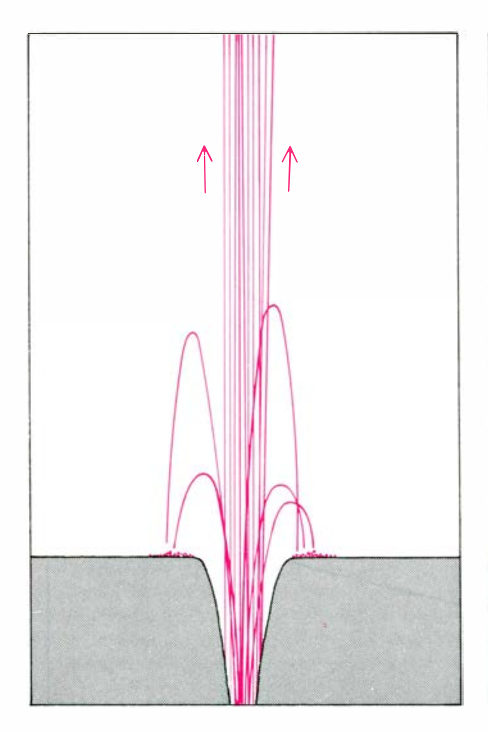
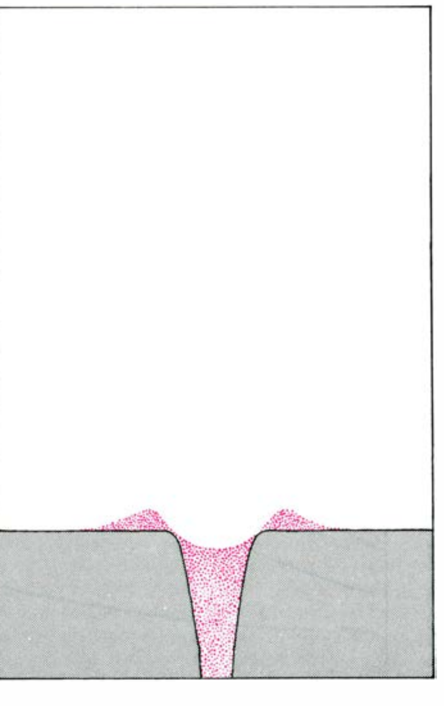
El proceso por el que los granitos lunares llegan a ser distintos de los granitos terrestres está siendo estudiado por Paul C. Hess y Malcolm J. Rutherford, de la Brown University. Han encontrado, en ensayos de laboratorio, que el carácter reductor de un magma lunar artificial hace que tienda a enriquecerse en hierro a medida que determinados cristales se van separando: el hierro ferroso tiende a permanecer en solución mientras que el hierro férrico, más óxidado, quedaría retenido en la magnetita (Fe_3O_4) y precipitaría. El magma rico en hierro se divide luego en dos líquidos que, como ocurre con el aceite y el agua, no se mezclan. Uno de ellos es un líquido granítico qu posee la composición característica de las tectitas o granitos lunares. (El otro líquido es muy rico en hierro, del cual parece que se han encontrado pruebas recientes en las rocas lunares.)



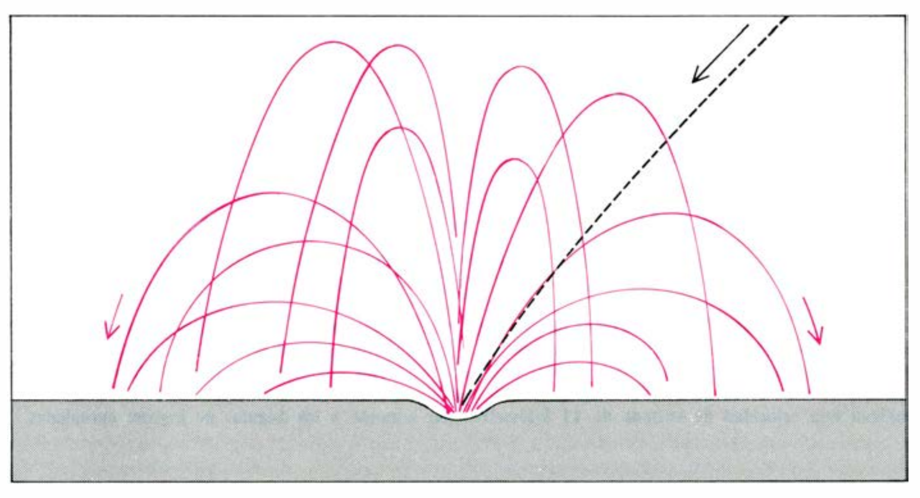
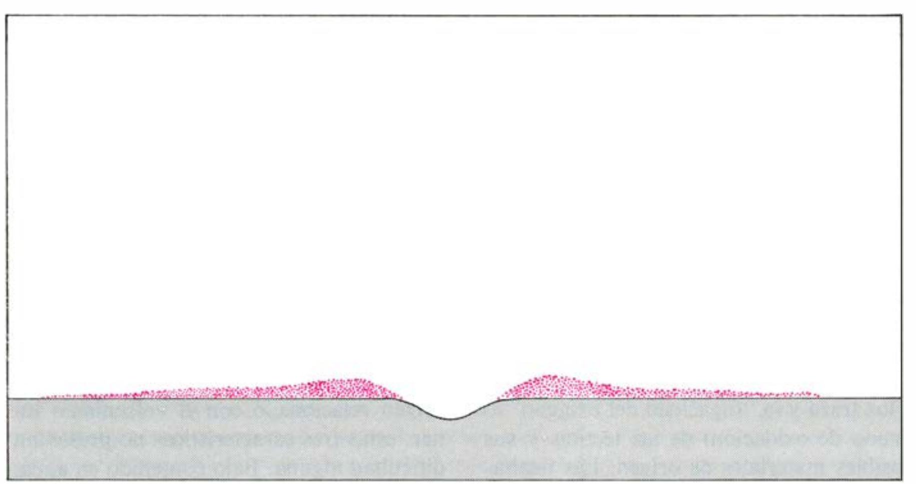
PROFUNDIDAD DE ABLACION calculada por Chapman y Howard K. Larson para distintas velocidades de entrada en la atmósfera y para diferentes ángulos de ingreso en la misma de acuerdo con la generalmente aceptada teoría de la ablación. Los números de las curvas dan el valor de la ablación en milímetros. Puesto que las australitas parecen haber perdido unos 10 milímetros por ablación, los cálculos indican una velocidad de entrada de 11 kilómetros por segundo a los ángulos de ingreso apropiados.

Si vamos más allá de la composición global de elementos, puede compararse el contenido en agua, los elementos menores y los traza y la "fugacidad del oxígeno" (o estado de oxidación) de las tectitas y sus posibles materiales de origen. Las tectitas son mucho más secas que los sedimentos terrestres, ya que contienen una cincuentava parte del agua que poseen estos últimos. Comparadas con los sedimentos terrestres, las tectitas tienen un déficit en elementos, cuyos compuestos siguen siendo volátiles a 1000 grados Celsius, tales como el plomo, el talio, el cobre y el cinc. Finalmente, tenemos el fuerte carácter reductor de las tectitas. Hacia unos 1200 grados Celsius, la fugacidad del oxígeno (es decir su presión parcial de equilibrio) es de sólo unas 10^{-14} atmósferas en las tectitas, frente a unas 10^{-8} en los basaltos terrestres.

Por otra parte, en lo que se refiere a un origen relacionado con el volcanismo lunar, estas tres características no presentan dificultad alguna. Bajo contenido en agua, bajo contenido en elementos volátiles y fugacidad del oxígeno baja constituyen los

LA ERUPCION VOLCANICA LUNAR (que el autor considera como fuente más probable de las tectitas) podría expulsar materiales a la velocidad de escape de la Luna, unos 2,5 kilómetros por segundo. El material estaría muy "agrupado" en velocidad y dirección *(izquierda)*. Una pequeña cantidad del mismo volvería a caer a la superficie lunar sin extenderse mucho *(derecha)*. Esto explicaría por qué la Luna no se ha encontrado sembrada de materiales de composición tectítica. Esta figura y la de abajo son de A. E. Brotman.

EL IMPACTO METEORITICO SOBRE LA LUNA lanzaría probablemente los materiales en muchas direcciones, y a velocidades muy distintas, esparciéndolos así sobre la superficie de nuestro satélite.

tres distintivos característicos de la composición de las rocas lunares según se puso ya de manifiesto en los primeros informes relativos a las muestras del *Apolo 11*. Brett ha demostrado recientemente que, a la temperatura de los magmas, la fugacidad del oxígeno de las tectitas se aproxima mucho al valor lunar. (Incidentalmente, poco antes de los primeros alunizajes, algunos de los que habíamos estudiado las tectitas predijimos que las rocas lunares poseerían un contenido bajo en agua y presentarían un déficit en elementos volátiles.).

Es cierto que la pérdida de volátiles, agua y oxígeno podría explicarse igualmente por el proceso de impacto meteorítico sobre la tierra, al menos desde el punto de vista cuantitativo y en lo referente a los principios que la regulan. Si se calienta una roca a una temperatura suficientemente elevada y durante un tiempo suficientemente largo, el agua, los elementos volátiles y el oxígeno se liberarán de ella.

Sin embargo, surgen serias dificultades si se intenta explicar estas pérdidas desde el punto de vista cuantitativo. Los volátiles pueden liberarse a una velocidad razonable sólo si se forman burbujas que asciendan a la superficie de un líquido. Dentro de una tectita propulsada por un meteorito hasta una trayectoria balística, la aceleración de la gravedad es nula. La burbuja no puede ascender porque no existe el "arriba". Incluso bajo condiciones de gravedad terrestre normales, el proceso de eliminación de burbujas del vidrio, al que los vidrieros denominan afinado, tarda hora o días en producirse; es un factor de primer orden en el costo del vidrio comercial y ha sido estudiado cuidadosamente.

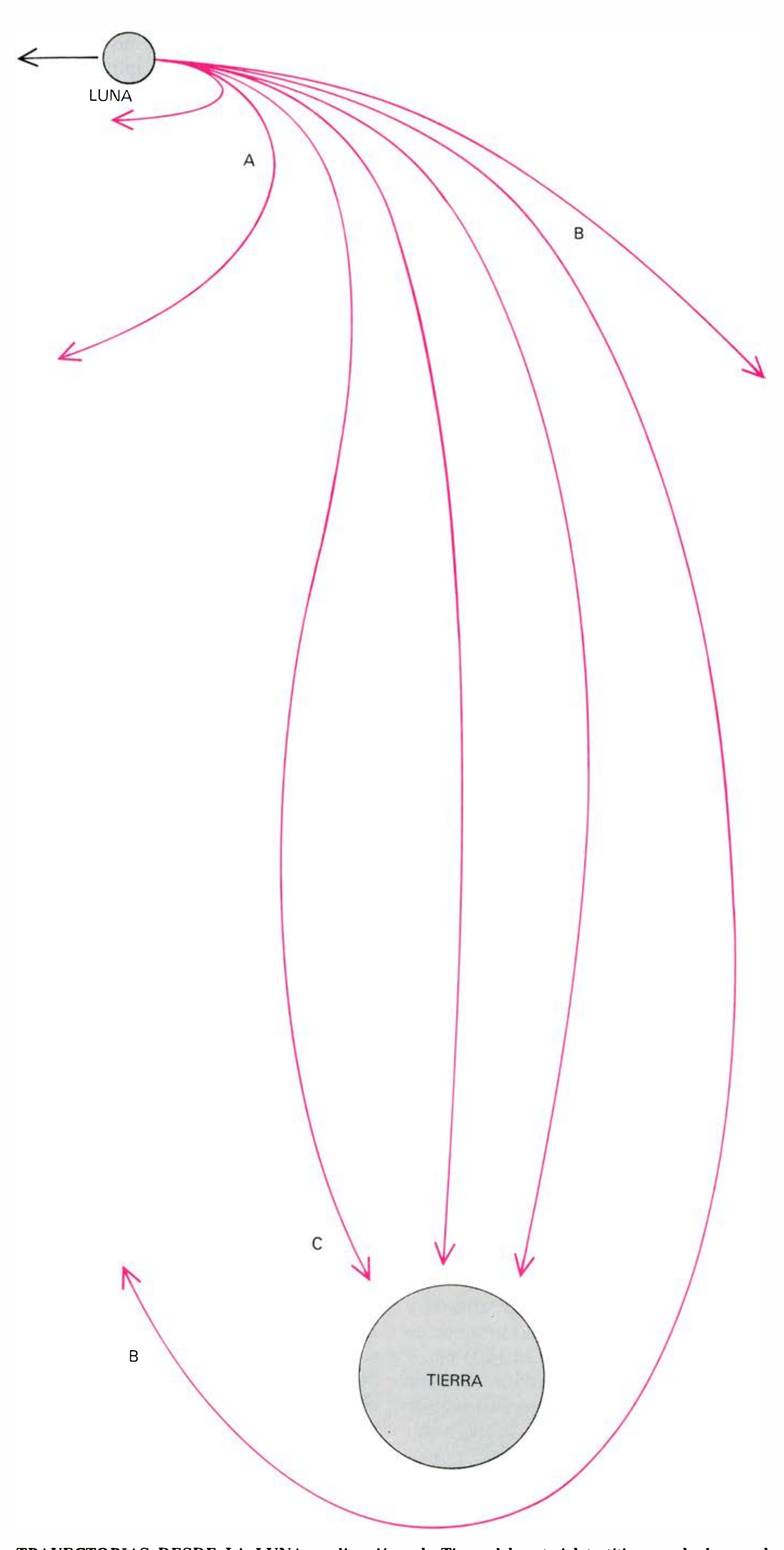
El afinado es bastante difícil con componentes del vidrio secos y puros y con un vidrio de viscosidad baja. En el caso de componentes húmedos e impuros y de un vidrio muy viscoso resultaría asombroso que el afinado pudiera realizarse durante los escasos minutos anteriores a la solidificación del material tectítico y en ausencia de un valor eficaz de la gravedad.

La gran reducción de la fugacidad del oxígeno necesaria para transformar un vidrio terrestre en material tectítico conlleva una dificultad parecida. Significa que el óxido férrico (Fe_2O_3) debe pasar a óxido ferroso (FeO) mediante la liberación de un volumen de oxígeno substancialmente mayor (a la presión atmosférica) que el volumen de la tectita. Los experimentos nos demuestran que a presión atmosférica la reducción cesa para una relación óxido férrico/óxido ferroso ocho veces superior, aproximadamente, que la misma relación

existente en las tectitas, incluso a temperaturas muy elevadas.

Existen pequeñas discrepancias entre los elementos traza de las tectitas y el único granito lunar que ha sido cuidadosamente analizado (la muestra 12013 procedente del *Apolo 12*). La muestra lunar es más rica en cromo, teniendo una relación potasio/uranio más baja, una relación plomo 206/plomo 204 más elevada, un valor diferente en cuanto a la abundancia de tierras raras y un valor menor de la relación oxígeno 18/oxígeno 16. Por otra parte, algunos de los análisis más recientes han permitido que las tectitas con cromo pudieran considerarse de ámbito lunar; a su vez, el material de la luna en el que se podía conocer la relación potasio/uranio ha aparecido como afín a las tectitas. Este material lunar posee igualmente una relación de isótopos del plomo y unas distribuciones de tierras raras básicamente parecidas a las existentes en las tectitas. En cuanto a la discrepancia entre los isótopos del oxígeno, puesto que existen unas relaciones algo similares en la superficie de los granos de polvo lunares, ello puede indicar simplemente que el material que compone las tectitas ha estado durante determinado tiempo en forma de partículas muy finas, posibilidad que está avalada por algunos aspectos de su morfología. Por consiguiente, los datos químicos están algo más a favor de un origen lunar que de un origen terrestre.

Sin embargo, los argumentos de más peso en favor de la hipótesis lunar se basan en una serie de sorprendentes pruebas aerodinámicas presentadas por Dean R. Chapman y sus colaboradores, del Ames Research Center de la Aeronautics and Space Administration. Chapman y otros autores han calculado que las tectitas lanzadas desde el suelo podrían desplazarse sólo unos pocos centenares de metros a través de la atmósfera en calma. Shao-Chi Lin, de la Universidad de California en San Diego, sugirió que la atmósfera podía no haber permanecido en calma: es decir, que el aire podía haber sido puesto en movimiento gracias a un impacto meteorítico gigantesco pudiendo, de esta forma, transportar las tectitas, a velocidades balísticas, hasta la parte más alta de la atmósfera. Lin calculó que la energía necesaria para un tal lanzamiento de las tectitas hubiera producido un cráter de unos 300 kilómetros de diámetro por 40 de profundidad. Chapman y Donald E. Gault confirmaron el cálculo de Lin, sugiriendo que sería bastante difícil que un cráter de este tipo hubiera quedado enmascarado. Y, verdaderamente, la existencia de tres cráteres de éstos (no descubiertos aun), en sus posiciones correctas para



TRAYECTORIAS DESDE LA LUNA en dirección a la Tierra del material tectítico expulsado por el volcanismo lunar. Los materiales lanzados a una velocidad algo superior a la de escape se colocarían (dada la velocidad de la Luna alrededor de la Tierra) en una órbita igual que la de la Luna *(A)*. Los materiales expulsados a velocidades muy elevadas entrarían en una órbita retrógrada *(B)* que no alcanzaría la Tierra, e iría a parar finalmente a una órbita alrededor del Sol. Solamente los materiales expulsados a velocidades comprendidas dentro de un reducido intervalo *(C)* entrarían en una órbita que se cruzaría con la Tierra.

explicar los campos de dispersión de Australasia, Norteamérica y Costa de Marfil, es en realidad muy dudosa.

En una brillante serie de experimentos y cálculos Chapman demostró precisamente cómo la curiosa forma en rueda de tren de las tectitas de Australia, denominadas australitas (y que son como la que trajo Darwin), es generada por ablación aerodinámica. Ya en 1893, el geólogo alemán A. W. Stelzner había sugerido que las australitas habían poseído, en un principio, forma esférica y habían estado parcialmente fundidas, de modo que desde la parte frontal se produciría un flujo hacia atrás de la masa fundida de la tectita por el efecto de arrastre del aire. Chapman disponía de vidrio obtenido para imitar la composición química de las australitas y sometió las muestras a una corriente de aire caliente producida en un chorro en arco. El vidrio fluyó hacia atrás desde la superficie frontal, enrollándose en la forma característica de rueda de tren, idéntica incluso a las "ondas anulares", circulares o espirales, de las tectitas naturales.

Chapman demostró que la forma en rueda de tren, la intensidad de la ablación y la disposición de las ondas anulares eran incompatibles con un origen terrestre. Las australitas podían adquirir solamente la forma citada en un vuelo estable. (La mayoría de las tectitas no empiezan a buen seguro como esferas regulares; durante el vuelo dan vueltas adquiriendo formas irregulares por ablación.) Las australitas sólo serían estables durante el paso a través de un medio cada vez más denso; la intensidad de la ablación indica una velocidad de 10 a 12 kilómetros por segundo. Lo cual resulta acorde con un descenso a través de la atmósfera a la velocidad de entrada (11,2 kilómetros por segundo), propia de un objeto procedente de la Luna. Los cálculos de Chapman, confirmados por mí mismo y mis colegas, se basan en la bien comprobada teoría de la ablación, fundamento del diseño de los escudos antitérmicos de las naves espaciales de la NASA y de los misiles militares.

Al escoger entre el impacto terrestre y el volcanismo lunar nos encontramos en la misma situación descrita en 1804 por el francés, pionero en meteoritos, Antoine François de Fourcroy, "obligado a escoger entre dos ideas tan inaudita la una como la otra". Fourcroy escribió a este propósito: "sólo eliminando lo absurdo o lo imposible nos vemos obligados a aceptar lo que en principio hubiera parecido casi increíble" (que los meteoritos caen del cielo).

Es absurdo suponer que la Tierra tiene varios cráteres de edad cenozoica por descubrir mayores que Irlanda, o que los cálculos clásicos sobre escudos térmicos contienen errores de bulto no advertidos, que habrían producido un infravaloración de los fenómenos de ablación en un factor de cinco. Es imposible obtener trozos grandes de vidrio, de buena calidad y desprovistos de agua, de forma instantánea a partir de rocas corrientes y de suelo, o lanzar grandes partículas desde la Tierra a seis kilómetros por segundo impulsadas por choque, o penetrar la atmósfera con trozos vítreos de pocos gramos de peso a velocidades hipersónicas. Nos vemos, pues, obligados a aceptar en conclusión que las tectitas, a pesar de su gran parecido con las rocas terrestres, han sido lanzadas hasta la Tierra por un volcán, o volcanes, situados en la Luna

Si las tectitas provienen de la Luna constituyen un grupo seleccionado de vidrios volcánicos. El volcanismo lanza sus productos en direcciones casi verticales (por lo menos en la Tierra), lo que significa que el material puede ser impulsado hacia la Tierra sólo desde una serie limitada de puntos de la Luna. En ese caso, las tectitas constituyen una submuestra limitada de los materiales graníticos de la Luna. No es razonable esperar que las propiedades medias de los granitos lunares se equiparen a las de las tectitas. Sólo se puede esperar que estas propiedades no sean incompatibles con la composición de las tectitas, requisito que parece cumplirse en los granitos lunares estudiados. La objeción de la composición, que se aduce contra el origen lunar de las tectitas, puede así refutarse.

Otro argumento que contradice el origen lunar arranca de la distribución localizada en que se encuentran las tectitas en la Tierra. Se sostiene que las tectitas que no caen a la Tierra en su primera pasada irían hacia una órbita alrededor del Sol, siendo capturadas finalmente por la Tierra y cayendo según una distribución uniforme sobre su superficie (a menos de que exista algún mecanismo que las destruya antes de ser capturadas de nuevo). Pero este mecanismo existe realmente. Si el albedo, o reflectividad, de un cuerpo pequeño en movimiento a través del sistema solar se distribuye de tal modo que su valor promedio en el lado derecho sea tan sólo ligeramente diferente del correspondiente al lado izquierdo, el objeto se verá obligado a girar sobre sí mismo a causa de la presión de radiación diferencial de la luz del Sol. La velocidad de giro aumentará, hasta hacerlo estallar, en unas decenas de miles de años, destruyendo de este modo una tectita en órbita.

Finalmente, ¿cómo deben explicarse los escasos cráteres que parecen tener una relación real con determinadas asociaciones de tectitas: las irghizitas, las tectitas del Aouelloul y, tal vez, las tectitas del tipo de vidrio de Darwin? No todas las tectitas tienen que proceder necesariamente de la Luna en forma de pequeños objetos. A veces los volcanes terrestres lanzan grandes bloques. Se puede concebir cuando menos que un bloque de tectita de varios millones de toneladas de peso hubiera podido ser lanzado hacia Tierra por una violenta erupción lunar, excavar luego el cráter de Zhamanshin y desintegrarse en el proceso; después de lo cual, el material constituyente del mismo se habría solidificado de nuevo para formar las irghizitas.

La clave para resolver el problema de las tectitas radica en insistir sobre una hipótesis física razonable, rechazando resueltamente el espejismo de las meras coincidencias numéricas, como, por ejemplo, el parecido entre los sedimentos terrestres y el material de las tectitas. Creo que la hipótesis del volcanismo lunar es la única físicamente posible y debemos aceptarla. Si lleva a conclusiones inesperadas, pero no imposibles, ahí estriba, precisamente, su utilidad.

Por citar sólo un ejemplo de esa utilidad, puede afirmarse que el origen lunar de las tectitas favorece en gran manera la idea de que la Luna se formó a partir de la Tierra por fisión. Las tectitas son realmente mucho más parecidas a las rocas terrestres de lo que podría esperarse de una asociación al azar. Si las tectitas provienen de un magma lunar, debe entonces existir, en zonas lunares profundas, materiales muy parecidos a los del manto de la Tierra (más afines al manto que a las partes más superficiales de la Luna de donde se han originado los basaltos de su superficie). Si la Luna se formó por fisión a partir de la Tierra, el cuerpo en que se convirtió la Luna tendría que haber sido calentado fuertemente desde el exterior y habría perdido la mayor parte de su masa original, especialmente sus elementos más volátiles. Las lavas que constituyen la mayor parte de la superficie actual de la Luna se emitieron en las primeras etapas de su historia, cuando su calor interno estaba concentrado en la zona poco profunda, relativamente desprovista de masa y situada bastante cerca de su superficie. Durante períodos recientes, representados por caídas de tectitas, las fuentes del volcanismo lunar han sido necesariamente mucho más profundas, de tal forma que los volcanes responsables de las tectitas han aprovechado el material lunar que quedó menos afectado durante el período de ablación y que, por tanto, es muy parecido al material del manto terrestre sin alterar. Paradójicamente, esto explicaría por qué las tectitas se parecen , en algunos aspectos, más a las rocas terrestres que a las rocas de la superficie lunar.

Organismos que captan corrientes

Gran diversidad de especies, desde las esponjas marinas a los perrillos de las praderas, aprovechan las fuerzas aerodinámicas e hidrodinámicas para aumentar el flujo de aire o agua que pasa a su través o al de sus moradas

Steven Vogel

En cualquier sistema ecológico, la energía química almacenada en el alimento es un producto precioso. No sólo su cantidad es limitada, sino que para los animales es costoso obtenerla en términos de energía: la caza, la recolección y la alimentación por filtración son actividades que consumen energía. En consecuencia, muchas especies han desarrollado mecanismos que utilizan las copiosas formas de energía mecánica que existe en el ambiente, como las corrientes de agua o el viento, para realizar tareas que normalmente requerirían un gasto de energía química. Estos animales, que van desde las arañas de torreta a los perros llaneros, han conseguido una considerable ventaja adaptativa en la rigurosa economía energética del mundo vivo.

La principal fuente de energía mecánica en el ambiente es la diferencia entre la velocidad de un fluido y la del sustrato sólido sobre el que el fluido se desplaza. (En último término, estos flujos –corrientes de aire en la atmósfera y corrientes de agua en el océano– son movidos por energía que procede del Sol.) Si se tiene el sistema transductor adecuado, la diferencia de velocidad creada junto a la interfase entre una corriente y un sustrato (como el suelo o la superficie de un animal) puede convertirse en formas útiles de energía. Puesto que la energía de una corriente reside en el movimiento de un fluido, una aplicación biológica simple y directa es hacer que parte del mismo fluido se desplace a través de un sistema de conductos internos. Efectivamente, la mayoría de los organismos que captan corrientes lo hacen para bombear aire o agua a su través (para facilitar la respiración o la filtración del alimento) o a través de un nido o madriguera (para su ventilación o humectación).

¿Cuáles son algunos de estos métodos simples mediante los cuales se pueden aprovechar las corrientes para que el flujo de aire o de agua pase a través de un organismo o de una madriguera? Un mecanismo se basa en el principio de la conservación de la energía en un fluido con movimiento uniforme, formulado por primera vez por el matemático suizo Daniel Bernouilli en 1738. El principio señala que si un fluido se desplaza horizontalmente de modo que no exista ningún cambio en la energía gravitacional potencial, la presión del fluido disminuye cuando quiera que su velocidad aumente, de manera que su energía total permanece constante. Por ejemplo, si el fluido se desplaza a través de un tubo horizontal que se estrecha y se ensancha en distintos puntos, el fluido debe avanzar con más velocidad al pasar por las zonas de menor diámetro, de modo que ejerce una presión menor en aquellos lugares en los que la luz del tubo es más pequeña. El principio de Bernouilli explica la función del ala del avión: puesto que el aire se mueve más de prisa sobre el ala que bajo ella, crea una diferencia en la presión del aire entre la parte superior y la parte inferior del ala, es decir, la fuerza ascensional.

Consideremos ahora un pequeño tubo en forma de *U* que conecta dos puntos de un conducto más amplio con los dos extremos del tubo pequeño perpendiculares al tubo mayor. El fluido en el tubo pequeño se desplazará desde el extremo en el que el flujo en el conducto es más lento (ejerce una mayor presión) hacia el extremo en el que el flujo en el conducto es más rápido (ejerce una presión menor). La velocidad del flujo de la corriente sobre una de las aberturas puede aumentarse elevando la abertura o alterando su forma, de modo que sea de bordes más agudos o menos resguardados. De esta manera puede inducirse un flujo en el tubo pequeño de forma independiente de la dirección del flujo de la corriente en el conducto mayor. Por ejemplo, el flujo de humo que sube por una chimenea aumenta cuando sopla el viento, sea cual sea la dirección de éste.

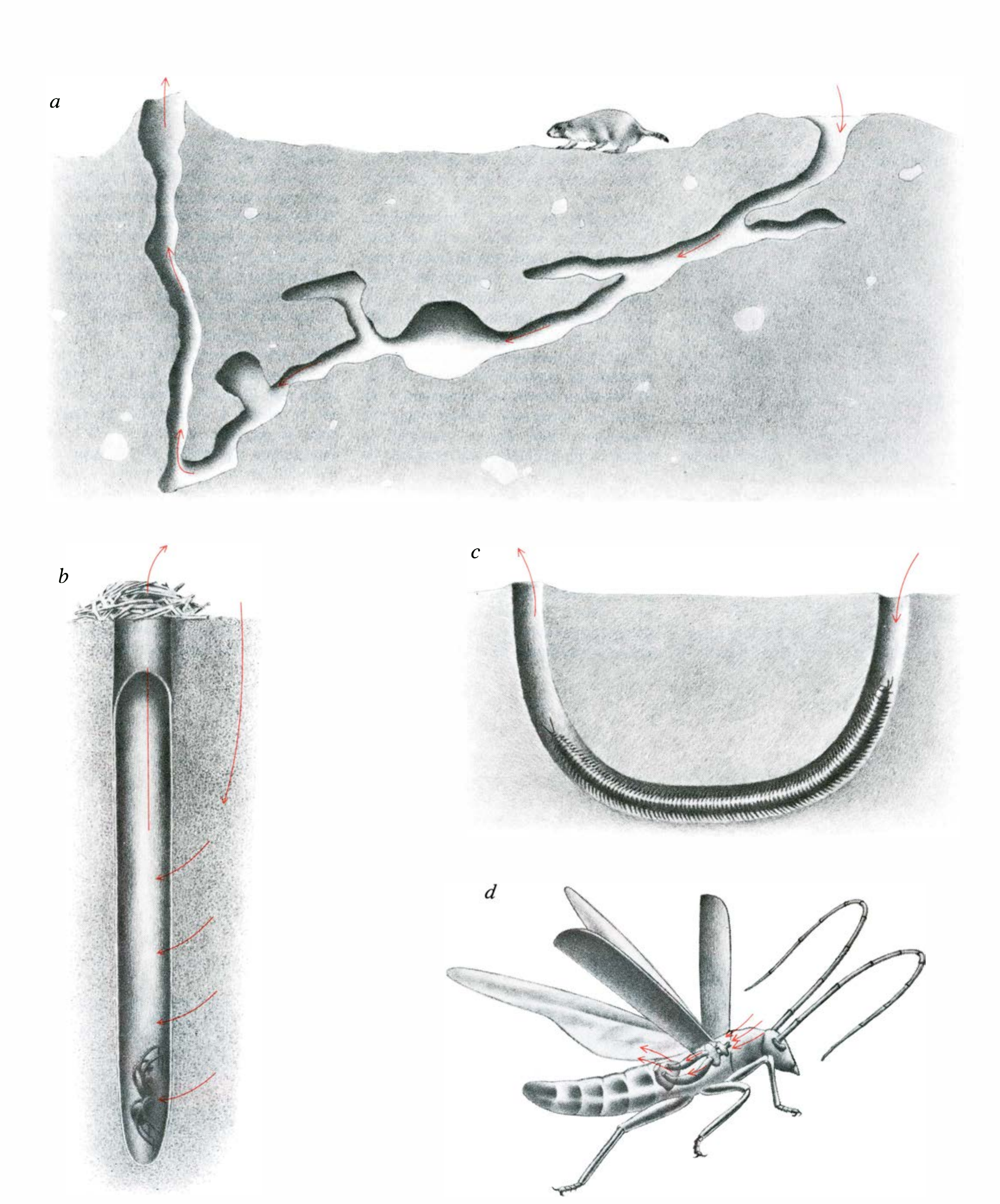
También puede provocarse un flujo por la presión dinámica de la corriente como una consecuencia menos directa del principio de Bernouilli. Si se dobla un pequeño tubo en un ángulo de 90 grados y se orienta en un conducto mayor de modo que un extremo se dirija corriente arriba y el otro se abra perpendicularmente al flujo de la corriente, la abertura perpendicular se hallará expuesta únicamente a la presión estática de la corriente, mientras que la abertura dirigida hacia la corriente estará expuesta además a la presión dinámica del fluido que se desplaza. Por tanto, se producirá en el tubo un flujo desde la abertura interior hacia la perpendicular.

Un tercer mecanismo para inducir un flujo se basa en la viscosidad (resistencia a fluir) de los fluidos reales, sean éstos gases o líquidos. El movimiento de un fluido sobre la abertura de un tubo orientado perpendicularmente a la corriente extraerá fluido del tubo, fenómeno conocido como arrastre viscoso. Cuanto mayor sea la abertura del tubo o cuanto más rápida la corriente, mayor será el arrastre.

Estos tres efectos físicos pueden actuar por separado o conjuntamente para producir un flujo en un sistema biológico. Un sistema geométrico simple que se encuentra con frecuencia en la naturaleza, y al que yo llamo tipo I, consiste en un tubo en forma de *U* excavado en el interior de un sustrato sólido, con aberturas en ambos extremos.

Si ha de hacerse que el aire o el agua fluyan por este tubo, las aberturas han de diferir en forma, tamaño, elevación sobre el sustrato o exposición a las corrientes de agua o al viento. El flujo interno se desplazará desde la abertura más pequeña, más roma, más baja o más protegida (donde la presión del fluido es mayor) a la abertura mayor, más aguda, más alta o menos resguardada (en la que la velocidad del flujo de corriente es mayor, la presión del fluido es más baja y se produce un arrastre viscoso debido al mayor tamaño de la abertura o a la corriente más intensa).

Un ejemplo excelente de un sistema de tipo I para inducir flujo lo proporciona la madriguera del perrillo de las praderas colinegro *(Cynomys ludovicianus)*, especie indígena de las Great Plains de Norteamérica. Estos roedores son minadores consumados, y excavan túneles que en suelos



EL FLUJO DE AIRE O DE AGUA a través de la madriguera de un animal o del propio animal, con fines de ventilación, respiración o filtración, puede aumentarse utilizando la energía de las corrientes externas. Los ejemplos que aquí se ilustran comparten todos una geometría común, llamada de tipo I, en la que el movimiento de un fluido sobre un sustrato induce el flujo del mismo fluido a través de un tubo en forma de *U* excavado en el sustrato y con aberturas en cada extremo expuestas a la corriente. El aire o el agua son forzados a través del tubo debido a los efectos físicos que resultan del hecho de que las dos aberturas difieren en tamaño, forma, elevación sobre el sustrato o exposición a las corrientes de agua o al viento. En la madriguera del perrillo de las praderas (*a*) el aire fluye desde el montículo en forma de "domo", más bajo y redondeado, al montículo en forma de "cráter", más alto y de bordes más agudos, proporcionando así la ventilación necesaria. En la galería vertical de la araña de torreta (*b*) el aire penetra a través de la superficie porosa del suelo y sale a través de la abertura elevada de la galería, aportando aire húmedo que evita que el animal se deseque. La madriguera de un gusano marino (*c*) se parece a la del perro llanero porque una abertura es elevada sobre el sustrato, lo que induce el flujo de aire a través del conducto. En un coleóptero volador grande (*d*) el viento generado por el movimiento hacia adelante del insecto y el batimiento de las alas induce el flujo de aire a través de las grandes tráqueas respiratorias que se abren directamente al exterior, aumentando de este modo el aporte de oxígeno a los músculos de vuelo del insecto. (Dibujos realizados por Lorelle M. Raboni.)

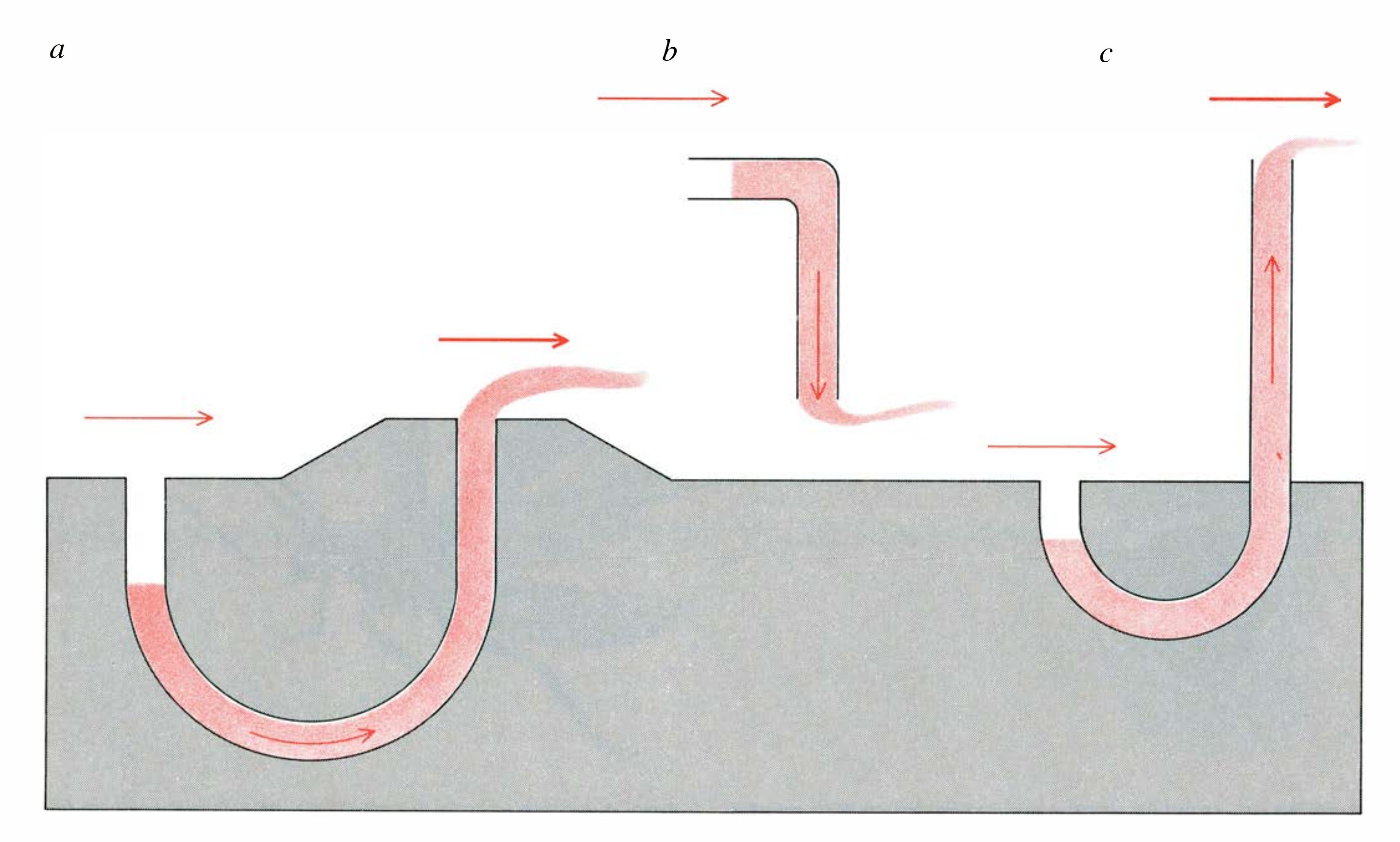
bien compactados pueden tener hasta 3 metros de profundidad y 15 de longitud. Aunque una "ciudad" de perrillos de las praderas suele parecer una compleja red de túneles, las madrigueras por lo general son simples galerías con dos brazos y con sólo una o dos cámaras laterales.

A partir de los datos que se poseen sobre el metabolismo del perro llanero, sobre las propiedades del suelo y las tasas de difusión, es fácil calcular que la difusión libre de oxígeno a través del suelo o del túnel es insuficiente para cubrir los requerimientos respiratorios de incluso un único animal que se halle echado en una cámara de anidación en el fondo de la madriguera. Además, en los meses cálidos el aire frío queda atrapado en las cámaras, lo que hace despreciables las corrientes convectivas libres. Entonces, ¿de qué manera llega el oxígeno necesario para los perrillos de las praderas que se encuentran en el interior de la madriguera? Presumiblemente los animales podrían forzar el paso de aire por sus túneles erizando su pelaje y corriendo por las galerías como pistones, pero como veremos disponen de una alternativa energéticamente más barata.

Cada extremo de la madriguera del perro de las praderas emerge del centro de un montículo de excrementos; se suele considerar que estos montículos funcionan como atalayas o como protección frente a las inundaciones rápidas. En una ciudad se encuentran dos tipos de montículos: una elevación baja y redondeada, en "domo", y otra más alta y de bordes más agudos, en "cráter". Evidentemente, la diferencia es algo más que un accidente de excavación, puesto que después de unas lluvias los animales reconstruyen cuidadosamente los montículos, conservando la distinción de formas. Delbert L. Kilgore, Jr., de la Universidad de Montana, identificó las aberturas de una madriguera determinada mediante el simple método de introducir humo por un agujero y observar por dónde salía. Encontró que una madriguera típica tiene un montículo en cráter en un extremo y un montículo en domo en el otro.

La madriguera del perrillo de las praderas posee, por tanto, los requisitos geométricos de un inductor de flujo de tipo I. ¿Fluye realmente el aire a su través? Kilgore echó pequeñas bombas de humo en unas cuantas madrigueras y comprobó que cuando se levantaba un poco de viento aparecía una pluma de humo sobre el extremo de la madriguera con el montículo más alto, en cráter. Para comprobar si se trataba de un mecanismo de tipo I, Charles P. Ellington y yo, trabajando en mi laboratorio en la Universidad de Duke, construimos una maqueta de madriguera en la que todas las dimensiones lineales se habían reducido diez veces, y probamos el modelo en un túnel de viento a velocidades del aire 10 veces superiores a las que cabía esperar en la naturaleza (un cambio compensa al otro). Cuando se añadieron a la maqueta de madriguera modelos a escala de un montículo en domo y otro en cráter, ésta transmitía aire de una manera que no se distinguía de la de la madriguera real. El efecto se detectaba en el túnel de viento a velocidades del viento bajas, lo que indica que incluso una brisa escasamente perceptible de alrededor de una milla por hora (0,45 metros por segundo) sobre una galería real bastaría para cambiar el aire de su interior alrededor de una vez cada 10 minutos.

Las medidas realizadas con una serie de montículos de distintas configuraciones sobre la maqueta de la madriguera demostraron que puede inducirse el flujo tanto mediante una diferencia de altura entre los montículos como por una diferencia de



EFECTOS FISICOS explotados por los seres vivos para inducir un flujo de fluido a través de determinados conductos internos con un gasto mínimo de energía metabólica. Según el principio formulado por el matemático Daniel Bernouilli, la presión de un fluido que se desplaza con movimiento uniforme decrece cuando su velocidad aumenta, de modo que su energía total permanece constante. Así, en *a* se inducirá flujo en un tubo en forma de *U* si uno de los extremos del tubo se eleva sobre el sustrato, porque allí la velocidad de la corriente será mayor y la presión, por tanto, menor. En *b*, como consecuencia menos directa del principio de Bernouilli, se induce flujo a través del tubo en forma de *L* porque la abertura perpendicular se halla sometida únicamente a la presión estática de la corriente, mientras que la abertura que se halla dirigida hacia ésta se ve sometida asimismo a la presión dinámica del fluido que avanza. Un tercer mecanismo para inducir flujo (*c*) se basa en la viscosidad (resistencia a fluir) de un fluido; el movimiento de una corriente sobre la abertura de un tubo orientado perpendicularmente a ésta extraerá fluido del tubo, efecto conocido como arrastre viscoso. En los casos *a* y *c* el flujo de aire o de agua a través del tubo es inducido en una sola dirección, independientemente de la dirección de la corriente externa. (Esquemas diagramáticos de Lorelle M. Raboni.)

forma: en la práctica las dos diferencias funcionan al unísono. La dirección del viento que pasaba sobre los montículos no alteraba la dirección del flujo del aire inducido a lo largo de la madriguera. Este descubrimiento tiene sentido "biológico": aunque el viento es un rasgo responsable del clima en Dodge City, Kansas (la estación de la Oficina Meteorológica más cercana a las madrigueras de Kilgore), la dirección del viento es muy variable.

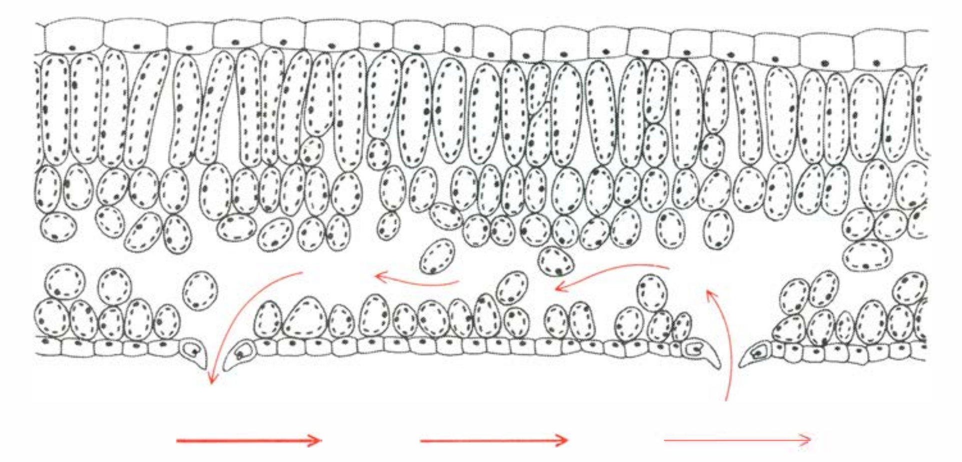
Las arañas de torreta (género *Geolycosa*) construyen galerías verticales con una sola abertura en arena o en suelo poroso, en cunetas, en campos abiertos o en taludes litorales. Sobre la entrada de la madriguera se encuentra la "torreta", un anillo crateriforme de arena, guijarros o pedazos de vegetación de cerca de un centímetro de altura, tapizado y sujeto mediante seda. Durante el día la araña permanece en el fondo de la madriguera, a unos 30 centímetros por debajo de la superficie; por la noche se arrellana en la torreta, acechando para lanzarse sobre la presa. Tampoco esta estructura es un mero accidente de excavación: además de servir de atalaya adecuada y de prevención frente a los objetos incomibles que puedan caer en el interior de la madriguera, la torreta produce un flujo de aire a través del túnel. Si se inserta un pequeño aparato medidor de flujo en la madriguera, y otro cerca de la torreta, pueden correlacionarse los registros de ambos: cuando una brisa atraviesa la torreta, el aire de la madriguera se desplaza hacia arriba.

Si la madriguera sólo tiene una abertura, ¿de dónde procede el aire? La respuesta es que la superficie de la arena o del suelo que rodea la entrada sirve de segunda abertura, puesto que sólo se necesitan presiones muy débiles, fácilmente generadas por vientos suaves, para impulsar aire a través del sustrato poroso en el que viven las arañas. De modo que la galería de la araña de torreta cumple los requisitos del modelo de tipo I.

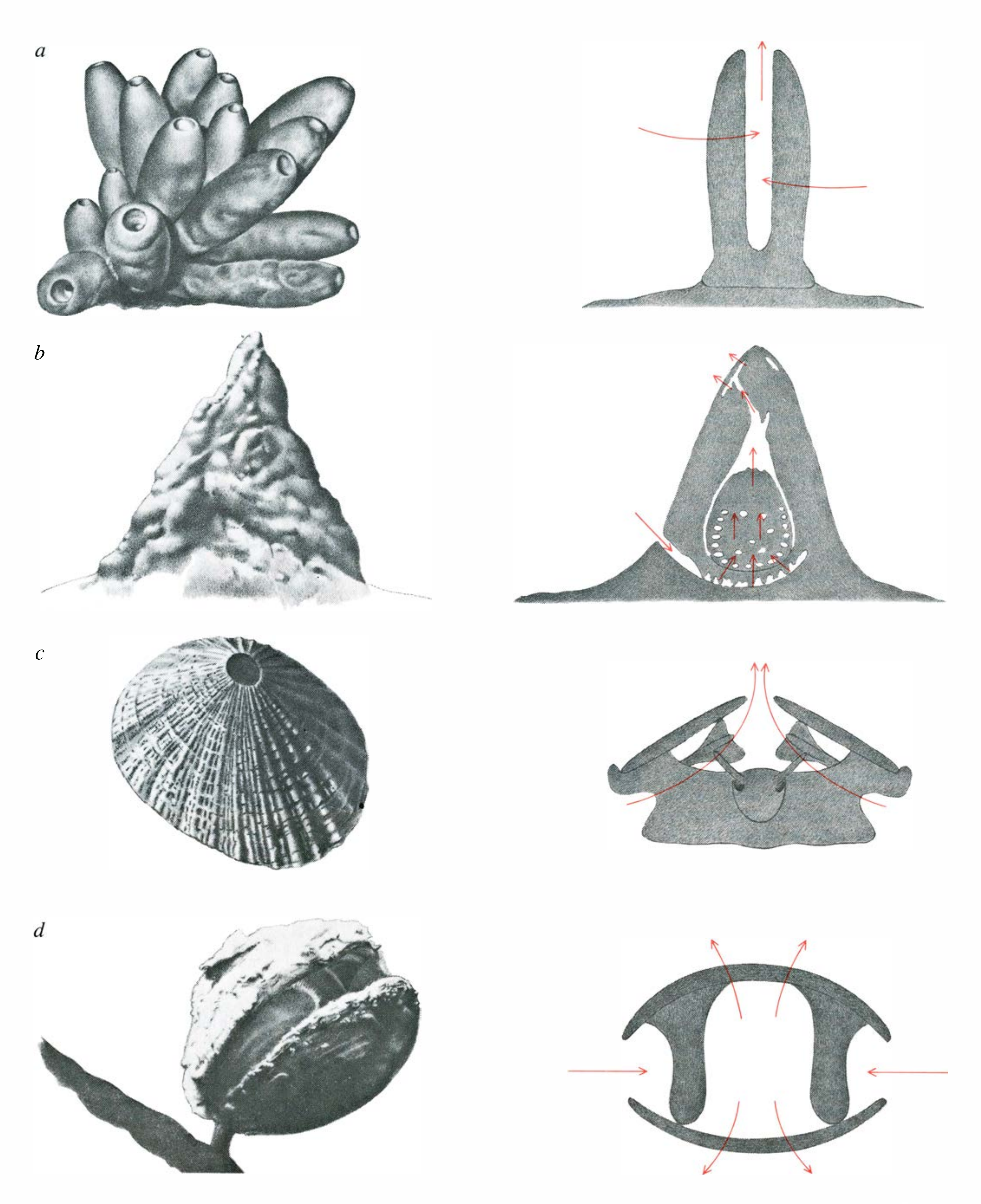
¿Cuál es el significado funcional que tiene para las arañas el flujo de aire inducido? ¿Es sólo el subproducto de una torreta construida para otros fines o desempeña un papel más directo? Las arañas de torreta viven en zonas equivalentes a desiertos locales, y puesto que no tienen acceso regular al agua estancada la desecación puede convertirse en un problema grave. Sin embargo, incluso en un desierto, el aire entre las partículas del suelo o de la arena suele estar saturado de agua a sólo unos pocos centímetros bajo la superficie. Un sistema que absorba lentamente el aire húmedo hacia la madriguera permitirá que la araña pase el día inmersa en aire de humedad elevada, minimizando así la pérdida de fluidos corporales. Ade-



ESTOMA, o poro foliar, del nogal *Pterocarya stenoptera*, aumentado 6700 diámetros en esta micrografía electrónica de barrido. El estoma está rodeado por labios en forma de cráter que pueden inducir un flujo de aire en el interior de la hoja mediante un mecanismo de tipo I (muy similar al que origina el montículo en cráter de la madriguera del perrillo de las praderas), aumentando así la difusión de anhídrido carbónico en el interior de las células. Como consecuencia del efecto desecador del flujo inducido, estos estomas en forma de cráter suelen limitarse a las hojas de los hidrófitos (especies vegetales que poseen agua en abundancia).



SECCION TRANSVERSAL DE LA HOJA de un hidrófito; ilustra el flujo de aire inducido a través de los conductos aéreos continuos que conectan los estomas. Puesto que los estomas situados cerca del borde de la hoja que se halla contra el viento están sometidos a mayores velocidades de éste que las situadas más lejos del borde, el aire debe entrar por los estomas del centro de la hoja y salir por los del borde de la misma.



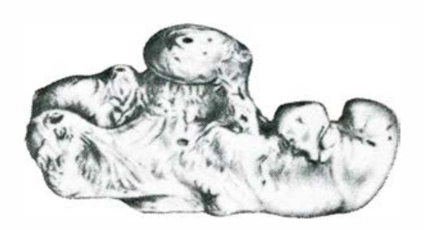
LA SEGUNDA DISPOSICION para la inducción de flujo, llamada de tipo II, es explotada por gran variedad de seres vivos. Esta configuración requiere una protuberancia cónica o cilíndrica del sustrato con pequeños agujeros alrededor de su base o recubriendo las paredes laterales, que están conectados internamente a una gran cavidad central; el aire o el agua fluyen hacia el interior de los agujeros periféricos y salen a través del ápice de la protuberancia. A diferencia del sistema de tipo I, todo el sistema de tipo II se sitúa sobre el sustrato. Las esponjas marinas (*a*) explotan el flujo inducido para aumentar la tasa a la que el agua oceánica rica en nutrientes pasa a través de su sistema de filtración. Los termiteros gigantes de los termes africanos del género *Macrotermes* (*b*) inducen el flujo de aire con el fin de ventilar la cámara de incubación en el centro del termitero. La lapa de ojo de cerradura (*c*) tiene una abertura, el "ojo de cerradura", en el ápice de su concha cónica, de modo que las corrientes inducen un flujo de agua desde debajo del reborde inferior de la misma hasta el ojo de la cerradura, por donde sale. El braquiópodo (*d*) se orienta perpendicularmente a la corriente, de manera que el agua es forzada hacia dentro a través de los lados de sus valvas abiertas, pasa a través del aparato de filtración que hay en su interior y sale por el centro de la abertura. Cuando la dirección de la corriente externa cambia, el braquiópodo gira sobre su pedúnculo para seguir disfrutando del flujo inducido. Es el único comportamiento que se le conoce

más, y como no sorprenderá a nadie que haya andado descalzo sobre arena en un día relativamente soleado y en calma, el aire en la parte superior de la madriguera puede calentarse mucho. Un lento flujo ascendente puede evitar la penetración del cálido aire superficial en la parte más profunda de la galería.

En la costa marina muchas llanuras fangosas intermareales están perforadas por miles de aberturas que pertenecen a las madrigueras de dos brazos de invertebrados marinos, tales como los gusanos poliquetos *Arenicola* y *Nereis* y los camarones excavadores. Como las galerías de los perros llaneros, estas madrigueras tienen una de las aberturas elevada sobre el sustrato, como puede demostrarse inyectando un colorante en una abertura con una jeringa, y observando por dónde sale el colorante. Los gusanos, por lo menos, excavan también su madriguera en cubos de fango en el laboratorio. Si se les puede sacar de su galería, puede demostrarse fácilmente la inducción de flujo en la misma; de hecho, dada la disposición de la madriguera, se necesitaría algún mecanismo especial para impedir la inducción del flujo cuando el agua que se encuentra sobre la misma se halla en movimiento.

Sin embargo, cuando un gusano marino se halla en su madriguera, su cuerpo tapona total o parcialmente el paso, y el gusano exhibe un amplio repertorio de movimientos bombeadores rítmicos, lo que hace surgir la pregunta de si el flujo inducido es significativo en condiciones naturales. Es evidente que los gusanos pueden sentir las corrientes externas, pero es difícil saber si utilizan las corrientes para aumentar su bombeo. Por otro lado, se ha señalado que algunos camarones excavadores abandonan el túnel principal de su madriguera y residen en una pequeña cámara lateral una vez han completado la excavación. En tales circunstancias el flujo sería ciertamente inducido, y podría servir para mejorar la alimentación y la respiración del animal.





LA FORMA DE UNA ESPONJA se ajusta a la magnitud de las corrientes locales predominantes para permitir la máxima utilización del flujo inducido. Se muestran dos colonias de la misma especie (*Halichondria panicea*). La esponja de la izquierda crece en aguas quietas y tiene extensiones en forma de chimenea sobre sus aberturas de salida, que están expuestas a las corrientes más importantes situadas más lejos del sustrato. La esponja de la derecha, en cambio, vive en superficies barridas por aguas de movimientos rápidos, y es por ello más baja, más redondeada y tiene agujeros de salida menores y menos complejos. La extrema plasticidad de que hace gala la esponja *Halichondria panicea* aumenta su versatilidad ecológica.

Un ejemplo de flujo inducido a nivel microscópico lo proporcionan los estomas, es decir, los poros de las hojas, a través de los cuales las plantas intercambian gases. En algunos hidrófitos (plantas que disponen de gran cantidad de agua) los estomas están rodeados por labios en forma de cráter y se hallan interconectados en el interior de la hoja mediante pasos de aire continuos. Ellington ha sugerido que el movimiento de aire a través de una hoja de este tipo puede inducir el flujo de aire hacia el interior de un estoma y hacia el exterior de otro, puesto que los estomas más cercanos al borde de la hoja que se sitúa contra el viento, estarían sujetos a una velocidad del viento superior a la que soportan los más alejados del borde. Si el flujo es provocado por un mecanismo de tipo I, los estomas del borde de la hoja deben funcionar como poros de salida y los del centro como poros de entrada. Observaciones del flujo de colorante a través de hojas cuyos canales aeríferos se habían llenado con agua indican que realmente tiene lugar este flujo de manera general, aunque a velocidades bastante bajas.

No es difícil imaginar la función que puede realizar un flujo de aire inducido en el interior de las hojas. Las plantas verdes utilizan anhídrido carbónico como fuente de carbono para crecer y almacenar energía, pero este gas es sólo un componente menor de la atmósfera, en la que se encuentra alrededor de una parte por cada 3000. Para que el anhídrido carbónico se difunda hacia el interior de una hoja, debe existir dentro de ésta una concentración todavía más baja. Un flujo de aire forzado, sin embargo, evitaría este requisito. El hecho de que sólo las hojas de los hidrófitos posean estomas con labios en forma de cráter, necesarios para la inducción del flujo, sugiere que únicamente las plantas con gran cantidad de agua a su disposición pueden tolerar el efecto desecante del flujo de aire inducido a través de sus hojas. Ha resultado difícil reducir el fenómeno a términos cuantitativos, porque los poros y los canales de las hojas tienen menos de una décima de milímetro de diámetro. Por esta razón, ha de determinarse todavía la contribución relativa de la difusión y del flujo inducido al intercambio de gases en las hojas de los hidrófitos.

¿Qué otras aplicaciones biológicas de la inducción de flujo del tipo I podría haber? Permítaseme sugerir unas cuantas posibilidades. Los insectos en vuelo consumen cantidades enormes de oxígeno, que llega a sus músculos de vuelo a través de un sistema de tráqueas que se abren directamente en la superficie del cuerpo del insecto.

En algunos coleópteros voladores grandes, el viento generado por el batimiento de las alas y el movimiento hacia adelante de los insectos se ha demostrado que induce un flujo de aire a través de las tráqueas torácicas. Las aves en vuelo requieren asimismo un rápido intercambio de gases y han desarrollado pulmones a través de los cuales el aire pasa en una sola dirección. En las aves más avanzadas los capilares aéreos tapizan los finos conductos de los pulmones de manera que el flujo inducido aumenta la difusión del oxígeno en la sangre.

Una especie de rata canguro *(Dipodomys spectabilis)*, del sudoeste de Norteamérica, construye montículos de varios decímetros de diámetro en medio de claros en la vegetación. Hasta una docena de agujeros relativamente grandes perforan la superficie del montículo; en conductos que irradian hacia fuera desde los agujeros, la rata almacena reservas de semillas y otros materiales vegetales. El montículo parece funcionar como un sistema inductor de flujo para introducir aire procedente del suelo húmedo en los conductos, aumentando así el contenido de agua del alimento almacenado, una de las pocas fuentes de agua de la rata canguro. Pueden encontrarse todavía otros ejemplos de flujo inducido en los distintos nidos y madrigueras de avispas, hormigas, roedores y topos, e incluso (para el agua) en los

orificios nasales de algunos peces. No hay, ciertamente, escasez de posibilidades en espera de investigación.

Otra disposición geométrica para la inducción de un flujo interno se denomina tipo II. Esta configuración comprende una protuberancia cónica o cilíndrica del sustrato, que posee pequeños agujeros alrededor de la base o recubriendo las paredes laterales; los agujeros se hallan conectados internamente a una cavidad central grande que se abre al exterior en la cúspide de la protuberancia. El aire o el agua fluye hacia los agujeros periféricos y sale por la cúspide de la cavidad central al exterior. A diferencia del sistema de tipo I, todo el sistema de tipo II se encuentra sobre el sustrato.

Las esponjas marinas proporcionan los mejores ejemplos de la inducción de flujo por un mecanismo de tipo II. Las esponjas viven haciendo pasar enormes cantidades de agua a su través (de 10.000 a 20.000 veces su volumen corporal por día) y filtrando de ella microorganismos y otras partículas nutritivas. El agua penetra a través de diminutos poros de la superficie del animal y es expulsada de modo forzado a través de una o más aberturas grandes en el extremo superior del animal.

Para sorpresa de los primeros investigadores, el flujo no es generado por la acción muscular, sino por el batimiento incontrolado de un número muy elevado de diminutos flagelos.

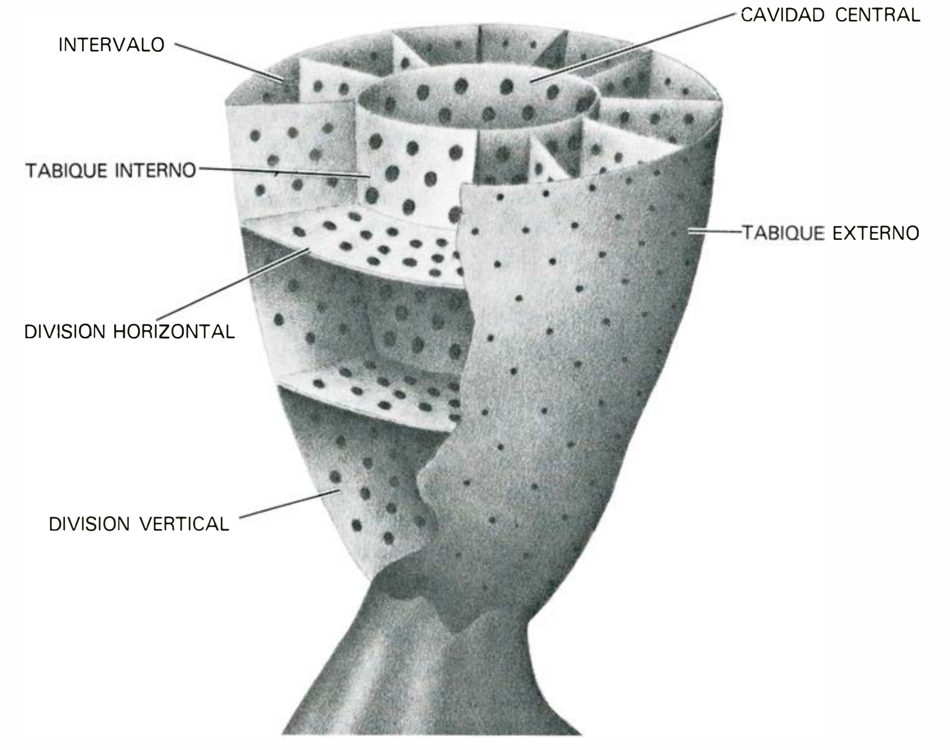
Según muchos datos, las esponjas marinas prefieren hábitats en los que el agua se mueve normalmente. En determinadas circunstancias, ¿aprovechan el flujo inducido al tiempo que bombean activamente mediante sus flagelos? Para responder esta pregunta, William L. Bretz, del Marine Laboratory de la Universidad de Duke, y yo mismo construimos un modelo cilíndrico en plástico de una esponja con un agujero grande cerca de su extremo superior y un anillo de agujeros más pequeños cerca de la base. Cuando el agua que rodeaba el modelo se movía, ésta fluía hacia el interior de los agujeros pequeños y salía por el agujero grande exactamente como si el "animal" estuviera bombeándola activamente.

En la Bermuda Biological Station pude registrar el flujo en el interior y en el exterior de ocho especies de esponjas sin arrancarlas de su lugar de fijación ni tan sólo tocarlas. En todos los casos, cualquier aumento en la velocidad de la corriente alrededor de la esponja se reflejaba de manera inmediata en un aumento de la tasa a la que el agua pasaba a través de la esponja. Incluso corrientes locales muy por debajo de la velocidad de bombeo de 10 a 20 centímetros por segundo eran efectivas, y corrientes superiores casi duplicaban la tasa de flujo. Para una esponja resulta evidente la ventaja de dicho aumento del flujo: la alimentacion por filtración es en la mayoría de los casos un asunto marginal, con el costo energético de procesar el agua no muy por debajo del rendimiento energético del filtrado. Cualquier mecanismo que aumente la tasa de filtración sin un coste metabólico directo resultará por tanto provechoso.

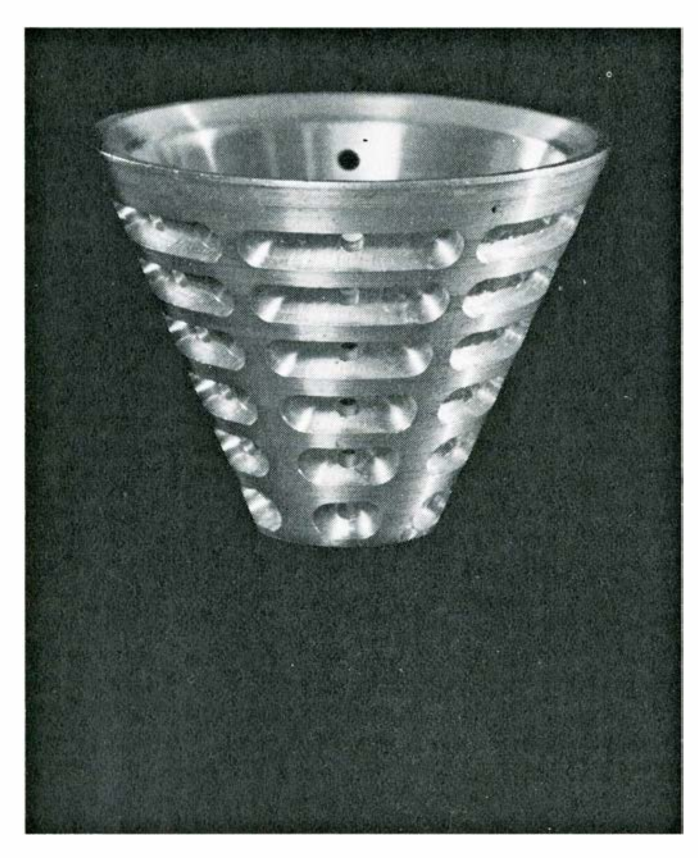
Investigaciones posteriores demostraron que las esponjas, supuestamente los animales macroscópicos más simples, se hallan exquisitamente diseñadas para obtener la máxima ventaja del flujo inducido. En la mayoría de especies existe un espacio abierto exactamente debajo del tegumento externo, que permite que el agua que penetra por los agujeros situados a favor de la corriente, gracias a la presión de ésta, entre asimismo en el lado del animal situado a contracorriente; un dispositivo de válvulas en el tegumento parece evitar el flujo de retroceso en aquellos lugares en los que la presión en el interior del animal es mayor que fuera del mismo. Como resultado, e independientemente de la dirección que tenga la corriente alrededor de una esponja, el animal puede aprovechar tanto la presión positiva del agua en sus agujeros de entrada a favor de la corriente, como la presión negativa en sus agujeros de salida.

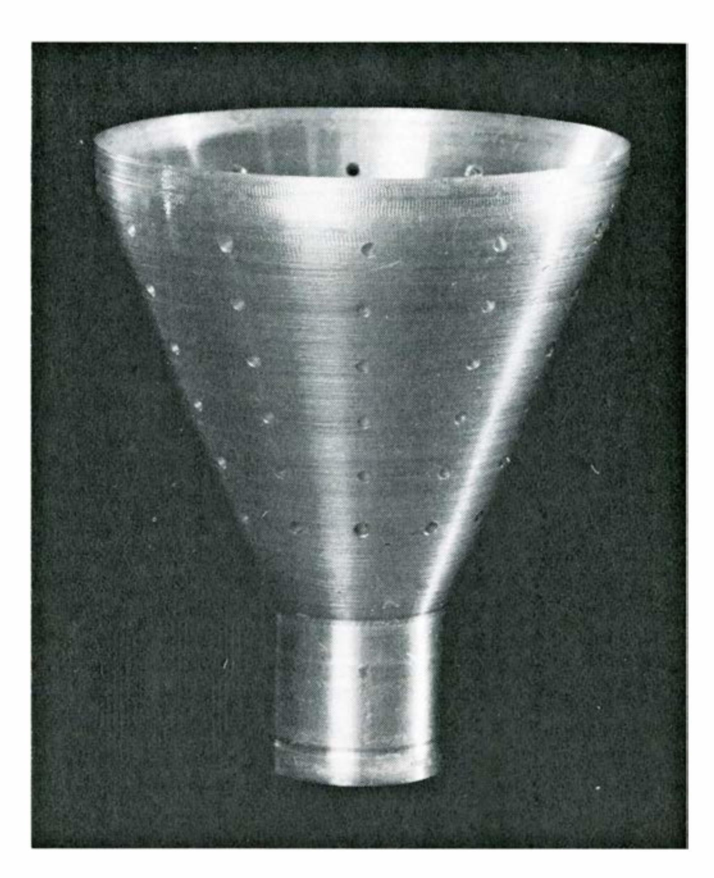
Además, la misma forma de las esponjas se ajusta a la magnitud de las corrientes locales predominantes, en perfecto ajuste para la máxima utilización del flujo inducido. Incluso en una misma especie, los individuos que viven en aguas relativamente quietas suelen ser más altos y pueden tener extensiones de sus aberturas de salida en forma de chimenea; esta disposición expone a los agujeros de salida a las corrientes más sustanciales, que se hallan más apartadas del sustrato. En contrapartida, las esponjas de la misma especie que crecen en superficies batidas por agua de movimientos más rápidos son más bajas, más redondeadas y tienen agujeros de salida menores y menos complicados. La extrema plasticidad de la forma de las esponjas es una notable estrategia para aumentar su versatilidad ecológica.

Los Arqueociátidos (literalmente, "copas viejas") fueron un grupo de animales sésiles que ocuparon una fracción importante de los arrecifes durante el período Cámbrico, hace unos 500 millones de años. Aunque no se sabe nada de su comportamiento ni de las partes blandas de su anatomía, el arqueociátido típico tenía unos 10 centímetros de altura, forma de copa y una cavidad central que se abría ampliamente en la parte superior y se hallaba rodeada por dos paredes concéntricas



LOS ARQUEOCIATIDOS eran animales sésiles, algo parecidos a las esponjas actuales, que proliferaron en el período Cámbrico, hace unos 500 millones de años. Un ejemplar típico tenía unos 10 cm de altura y forma de vaso, poseía una cavidad central que se abría ampliamente por arriba y se hallaba rodeado por tabiques concéntricos de material calcificado sostenido por divisiones horizontales y verticales. Los tabiques estaban perforados por gran número de agujeros cuyo diámetro aumentaba de la pared externa a la interna. Casi con seguridad, los arqueociátidos eran animales que se alimentaban por filtración, y puesto que sus restos fósiles se encuentran entre materiales sedimentarios de grano grueso parecen haber vivido en aguas agitadas. Verosímilmente utilizaban un mecanismo de tipo II para aumentar el flujo de agua a su través.





MODELO DE UN ARQUEOCIATIDO, construido en aluminio por William L. Balsam y el autor en la Universidad de Duke, para probar si el animal tenía la forma adecuada para beneficiarse del flujo inducido. En el modelo montado el cono de la izquierda encaja ajustadamente en el cono de la derecha cuando ambos se fijan mediante un tornillo que atraviesa sus ápices. Dos pequeños agujeros en la pared externa comunican con un agujero mayor en la pared interna a través de los surcos de la superficie del cono más pequeño. El modelo en cuestión tiene siete centímetros de altura y otros cinco centímetros de ancho.

EL FLUJO INDUCIDO a través del modelo de arqueociátido se demuestra en un tanque de flujo inyectando un colorante cerca de los poros externos. La corriente externa hace que el colorante penetre por los poros de entrada y salga a través de la cavidad central, como muestra esta fotografía. Se crea asimismo un torbellino en la cavidad central que hace que a través de los poros de la pared interna pase más agua hacia aquélla. La eficacia de esta inducción de flujo en dos fases sugiere que los arqueociátidos explotaban las corrientes externas para alimentarse si es que no dependieron por entero del flujo inducido.

de material calcificado. La pared externa estaba perforada por gran número de agujeros; la pared interna también lo estaba, pero los agujeros eran mayores. Probablemente los arqueociátidos eran animales filtradores y, puesto que sus restos se encuentran en sedimentos de grano grueso, debían vivir en aguas agitadas.

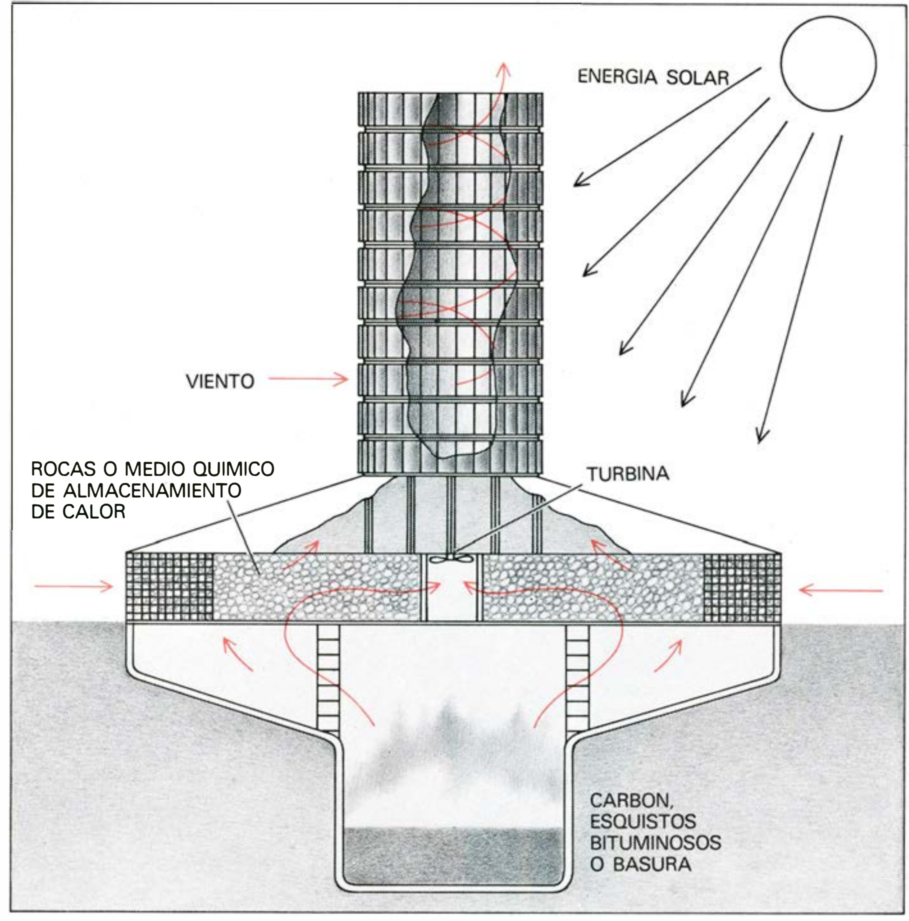
William L. Balsam, de la Universidad de Brown, fue el primero en señaque los arqueociáticos tenían una forma que seguramente les permitía aprovecharse del flujo inducido, a la manera de sus posibles parientes, las esponjas. Para probar esta hipótesis, Balsam y yo mismo construimos en aluminio un modelo de arqueociátido muy elemental: un cono invertido de doble tabique, con agujeros pequeños en el tabique externo y otros mayores en el interno. Cuando probamos el modelo en un tanque de flujo, el modelo inducía flujo de manera mucho más potente que el mejor modelo de esponja. Efectivamente, poseía un sistema de inducción en dos fases: la corriente externa no sólo succionaba agua de la cavidad central, sino que también producía en ella un gran remolino, que absorbía más agua a través de los agujeros de la pared interna.

El contraste entre las esponjas y los arqueociátidos plantea algunas preguntas interesantes. Las esponjas modernas que tienen el tamaño de los arqueociátidos fósiles poseen una abertura de salida más reducida, característica que reduce la eficiencia de la inducción de flujo, pero actúa como una boquilla al aumentar la velocidad de salida y disminuir la probabilidad de que cuando las corrientes externas son reducidas, la esponja no se encuentre en el caso de estar reingiriendo simplemente el agua que ya ha filtrado. Si los arqueociátidos carecían de una bomba movida metabólicamente, entonces sólo podían alimentarse por filtración en presencia de una corriente externa, con lo que nunca se habrían enfrentado con el problema de reingerir el agua ya filtrada. La amplia abertura de la cavidad central de los arqueociátidos ¿es una prueba de que estos animales carecían de una bomba activa? Si es así, quizás estos animales primitivos dependían mucho más de las corrientes que las esponjas, lo que constituye una ausencia de flexibilidad en el comportamiento que, en último término, pudo haber contribuido a su extinción. Una consecuencia de esta hipótesis es que la inducción de flujo en los animales filtradores macroscópicos puede ser un mecanismo más activo que el bombeo producido mediante el metabolismo.

Los termiteros gigantes de algunos termes africanos (género *Macrotermes*) combinan el problema de ventilación de la madriguera del perro llanero con la geometría de las esponjas marinas. En un termitero de hasta 5 metros de altura pueden vivir millones de termes con sus hongos asociados; su cuantiosa demanda de oxígeno hace necesario algún tipo de sistema de ventilación. En algunos termiteros que se encuentran en los bosques el calor generado en la cámara incubadora central produce una corriente convectiva de aire que se eleva a través del centro del termitero y desciende a través de pasajes periféricos localizados exactamente bajo las paredes externas. Sin embargo, en otros termiteros que se encuentran en terreno más abierto, los conductos periféricos están sustituidos por túneles de paredes porosas situados en derredor de la base del termitero y en una torreta en su cúspide. Según R. Loos, de la Universidad Nacional del Zaire, en estos termiteros el flujo de aire por convección se aumenta mediante una componente producida por el viento, lo que aparentemente es otro ejemplo de inducción de flujo mediante un sistema de tipo II.

Una especie distinta de terme africano construye termiteros provistos de grandes agujeros en forma de embudo, que se hallan conectados con la red de canales en el interior y bajo el termitero. John S. Weir, de la Universidad de Nueva Inglaterra, en Australia, comprobó que el aire penetra en estos termiteros a través de agujeros sin reborde, situados alrededor de la periferia del montículo, y sale por agujeros con reborde abiertos cerca de la cúspide del mismo. Algunos agujeros laterales del termitero podrían actuar a la vez como entradas y como salidas, según la dirección del viento, pero en su conjunto el flujo de aire en el interior del termitero es unidireccional, como ocurre en otros sistemas de tipo II.

Las lapas de ojo de cerradura (Fisurélidos) constituyen una familia de moluscos marinos de la misma clase que los caracoles, pero en lugar de ser conos arrollados, su concha es un cono plano no arrollado, dos o tres veces más ancho que alto y de 2 a 5 cm de longitud total. Viven ramoneando las algas que cubren las rocas de las zonas intermareal o submareal. Los fisurélidos se diferencian de las demás especies de lapas porque poseen una abertura, el "ojo de cerradura", en el ápice de su concha cónica. John Markham, de la Bermuda Biological Station, fue el primero en sugerir que las lapas de ojo de cerradura podían utilizar la inducción de flujo, y Gordon R. Murdock, de la Universidad



EXTRACTOR DE ENERGIA EOLICA diseñado por James T. Yen, de la Grumman Corporation. Este aparato prescinde de las largas palas de los molinos de viento convencionales y explota en su lugar una inducción de flujo de tipo II, de manera muy parecida a como lo hace una esponja. Las corrientes de convección de aire caliente, producidas por caldeamiento solar o mediante la combustión de un combustible, junto a las corrientes inducidas por el viento, accionan una turbina central que genera electricidad.

de Duke, descubrió posteriormente que el flujo de agua que atraviesa el molusco, desde el borde inferior de la concha hasta el agujero en el ápice, era más rápido cuando el agua en derredor se hallaba en movimiento. Más aún, algunas de estas lapas se orientaban de manera que las corrientes las bañaran mejor, y retiraban parcialmente sus branquias para permitir un flujo de agua incluso más rápido a su través. La función de este flujo inducido en las lapas de ojo de cerradura no es clara; los animales no se alimentan por filtración y viven en aguas bien oxigenadas, de modo que se requiere poca energía metabólica para satisfacer sus modestas necesidades respiratorias. No obstante, las branquias ocupan espacio, y el flujo inducido podría conferir una ventaja selectiva real si, por ejemplo, hiciera posible que el animal tuviera branquias más pequeñas y ovarios o testículos mayores.

Los Braquiópodos son otro grupo de invertebrados marinos. Aunque eran muy abundantes en los mares del Paleozoico, hace de 300 a 500 millones de años, en la actualidad sólo quedan unos cuantos cientos de especies. A primera vista los braquiópodos parecen bivalvos, pero sus conchas articuladas forman la parte superior e inferior del animal, y no las valvas izquierda y derecha. Las conchas se hallan separadas en uno de sus bordes, dejando al descubierto un complejo aparato de filtración en el interior. El agua abandona el filtro en el centro de la abertura y penetra por cada uno de los lados.

Michael C. LaBarbera, de la Universidad de Chicago, investigó varias especies de braquiópodos que se hallan fijadas mediante un pedúnculo a las rocas de la zona submareal. Observó que los animales giraban sobre su pedúnculo de manera que la porción central más ancha de la abertura se orientara perpendicularmente al flujo más rápido de la corriente, con los lados de la abertura expuestos a velocidades menores. Con esta orientación, la circulación de agua a través del sistema de filtración se acrecentaba mediante la inducción de flujo. Un cambio en la dirección de la corriente producía una variación en la orientación del animal, de modo que éste continuaba beneficiándose del flujo inducido. Estos resultados contradecían la creencia generalizada de que los braquiópodos no poseían prácticamente mecanismos sensoriales ni comportamiento manifiesto, puesto que los primeros investigadores pasaron por alto el flujo de las corrientes como estímulo ambiental. Los organismos se preocupan del flujo, y los biólogos también debieran preocuparse.

Sin duda, la explotación biológica más elegante y refinada de una diferencia de velocidad ambiental no corresponde al tipo I ni al tipo II, pero no puede dejar de mencionarse. Algunas aves practican lo que se llama planeo o cernido dinámico, mediante el cual son capaces de permanecer en vuelo sin batir las alas ni tener a su alrededor una corriente de aire ascendente. Al remontarse y descender alternativamente se hallan expuestas a distintas velocidades del viento, y de esta diferencia pueden extraer la energía necesaria para permanecer en el aire.

También los seres humanos han aprendido a derivar energía de las diferencias de velocidad. El funcionamiento de molinos de viento, carburadores, chimeneas y determinados tipos de ventiladores depende, por lo menos en parte, de la inducción de flujo. James T. Yen, de la Grumman Corporation, diseñó recientemente un extractor de energía eólica que no utiliza las largas palas de los molinos de viento convencionales: su aparato tiene cierto parecido funcional a una esponja. La arquitectura tradicional de muchas culturas explota asimismo el flujo inducido de aire para fines de caldeamiento o de refrigeración. Sydney A. Baggs, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, ha señalado que los mineros del ópalo de las llanuras desérticas australianas suelen ventilar sus habitáculos subterráneos mediante un sistema accionado por el viento que se parece al de la madriguera del perrillo de las praderas. Los tipis de los indios americanos de las Great Plains son estructuras cónicas con un reborde inferior poroso y una abertura cerca de la cúspide que inducen flujo mediante un mecanismo del tipo II; estas estructuras suelen estar bien ventiladas y son confortables en los calores del verano y capaces de contener un fuego en invierno sin asfixiar a sus moradores. La arquitectura tradicional de Oriente Medio proporciona ejemplos todavía más refinados de refrigeración mediante inducción de flujo (véase "Sistemas pasivos de refrigeración en la arquitectura iraní", de Mehdi N. Bahadori; INVESTIGACION Y CIENCIA, abril, 1978).

¿Qué conclusiones pueden extraerse de esta excursión a lo que podríamos llamar historia natural experimental? Un aspecto importante es que es necesaria una consideración cuidadosa e imaginativa del mundo físico cuando se investigan las estrategias adaptativas de los organismos vivos. Deben tomarse en consideración las oportunidades físicas particulares, así como las restricciones a las que vive sometido un organismo. Además, el biólogo debe pensárselo dos veces antes de invocar explicaciones de fenómenos que requieran un gasto de energía química hasta que se hayan descartado mecanismos físicos más sencillos. En cuestiones de energía, la naturaleza parece ser amante de las gangas.

Juegos matemáticos

Las bandas de Möbius tienen espesor finito; en realidad se trata de prismas retorcidos

Martin Gardner

La conocida banda de Möbius, que se obtiene retorciendo media vuelta una cinta de papel y pegando los extremos, puede considerarse modelo de superficie abstracta, de espesor nulo. No obstante, no existe ningún papel cuyo espesor se reduzca a cero. En realidad, la sección transversal de una banda de Möbius es un rectángulo, si bien muchas veces más largo que alto. La propia banda puede considerarse como un prisma de cuatro caras, retorcido de forma que una de sus bases gire 180° antes de unirla "a tope" con la otra. Vista con esta perspectiva, la banda de Möbius sería un aro macizo con dos "caras" distintas. Una de ellas sería la superficie lisa de la banda, que rodea dos veces al aro. La otra sería el delgado –aunque teóricamente plano– filo del papel, que también rodea dos veces al aro de la banda.

Durante los últimos quince años he recibido docenas de cartas de lectores que, independientemente unos de otros, habían observado que los modelos físicos de la banda de Möbius son en realidad prismas retorcidos. Muchos de ellos examinaron tipos más generales de tales aros, considerando, por ejemplo, prismas cuyas secciones transversales son polígonos regulares de un número cualquiera de lados. A pesar de que estas estructuras tienen muchas y extrañas propiedades, es sorprendente lo poco que se conoce sobre ellas. De hecho, la única referencia publicada en inglés de que tengo noticia es un artículo aparecido en 1972, titulado "Some Novel Möbius Strips", que aparece en la bibliografía de este número.

Todavía no se tiene una nomenclatura suficientemente admitida para designar estas estructuras, por lo que las llamaremos anillos prismáticos. Sea n el número de lados del polígono obtenido por seccionamiento transversal, y sea k el número de giros de amplitud $1/n$ que recibe el prisma antes de que se unan sus bases extremas. Si el prisma no sufre torsión alguna, entonces $k = 0$. Si se le retuerce (de uno de los dos modos posibles) de forma que cada lado se una con otro adyacente a él, entonces $k = 1$. Si cada lado se une con el consecutivo al siguiente, entonces $k = 2$, y así sucesivamente.

El anillo prismático más sencillo de visualizar es el anillo de sección transversal cuadrada. Si $k = 0$ (es decir, si el prisma no se retuerce), el anillo tiene, evidentemente, cuatro caras y cuatro aristas. Cuando $k = 1$ se obtiene el bello sólido que se muestra en la ilustración de esta página. (Es fotografía de una talla en madera original de Roger I. Canfield, quien me la envió tras leer mi sección de diciembre de 1968, dedicada a bandas de Möbius.) Lo mismo que la banda de Möbius, este cuerpo tiene solamente una "cara" y una única arista.

La primera vez que me tropecé con el anillo de $n = 4$ fue hace unos 25 años, en un cuento de ciencia-ficción. He olvidado el autor, pero, que yo recuerde, en la historia intervenía un personaje que se encontraba caminando por el interior de un anillo prismático de sección cuadrada al que se le había dado un cuarto de vuelta. No había gravedad, pero el personaje llevaba zapatos magnéticos que lo adherían al suelo. Observó una marca en el piso, y quedó muy sorprendido al volver al mismo lugar y encontrarse la marca en una pared. Otro circuito completo, y la marca pasó a encontrarse en el techo; otro más puso la marca en la otra pared, y en la cuarta vuelta volvió a encontrarse la marca en el suelo.

Retorciendo dos pasos un prisma de sección cuadrada se obtiene un cuerpo topológicamente equivalente a la familiar banda (¡sólida¡) de Möbius: cuerpo que tiene dos caras y dos aristas. Al retorcer tres pasos (lo mismo que al torcer un solo paso en sentido contrario) se producen una cara y una única arista. Finalmente, cuatro cuartos de giro vuelven a dar una estructura de cuatro caras y cuatro aristas. En todos los anillos prismáticos el número de caras es igual al número de aristas, y por ello en lo sucesivo consideraremos solamente el número de caras. La sucesión de números de caras va repitiéndose periódicamente cuando el número de pasos de torsión supera n. Así pues, un prisma cuadrado sometido a cinco giros elementales de torsión tiene igual número de caras que el obtenido por un solo giro. Obsérvese también que los anillos retorcidos son asimétricos respecto de todo plano, y que admiten isómeros ópticos por simetría especular.

Generalicemos las consideraciones anteriores para anillos prismáticos cuyas secciones transversales sean polígonos regulares de n lados. No es difícil predecir el número de caras que tendrá el sólido resultante tras k torsiones elementales. Resulta ser el m.c.d. (máximo común divisor) de n y k. Se deducen de este hecho varias propiedades interesantes. Cuando la sección transversal tiene número primo de lados, solamente se tendrá n caras cuando

Un anillo prismático retorcido, de una sola cara y una sola arista

k (número de pasos de torsión elementales) sea 0 o sea múltiplo de n. En los demás casos, el anillo tendrá solamente una cara. Si n no es número primo el anillo solamente tendrá una cara cuando n y k sean primos entre sí (no tengan divisores comunes mayores que 1). La tabla de la parte superior de esta misma página (que me envió en 1964 John Steefel) da el número de caras de los anillos prismáticos con secciones transversales de 2 a 15 lados cuando éstos sufren torsiones de 1 a 15 pasos de amplitud. Obsérvese que la banda de Möbius se presenta aquí como un anillo prismático degenerado cuya sección transversal tuviera solamente dos lados.

Lo bueno viene ahora. Todos sabemos que al cortar longitudinalmente cintas retorcidas pasan cosas raras. No lo son menos las que ocurren al cortar de diversas formas anillos prismáticos retorcidos. La ilustración central de esta página muestra ocho maneras de cortar un anillo de sección transversal cuadrada.

Examinemos la primera de ellas, que es una sencilla sección longitudinal por la mitad. Si $k = 0$ el resultado es, evidentemente, dos anillos separados, cada uno de ellos de cuatro caras y sin torsión. Si $k = 1$, el corte da dos vueltas al anillo y el resultado es el mismo que si se hubieran dado dos cortes longitudinales mutuamente ortogonales, como se muestra en la segunda serie del dibujo central. En esta operación se forma un único anillo cuatro veces más largo que el primitivo, cada uno de cuatro caras y 16 pasos de torsión de 90 grados.

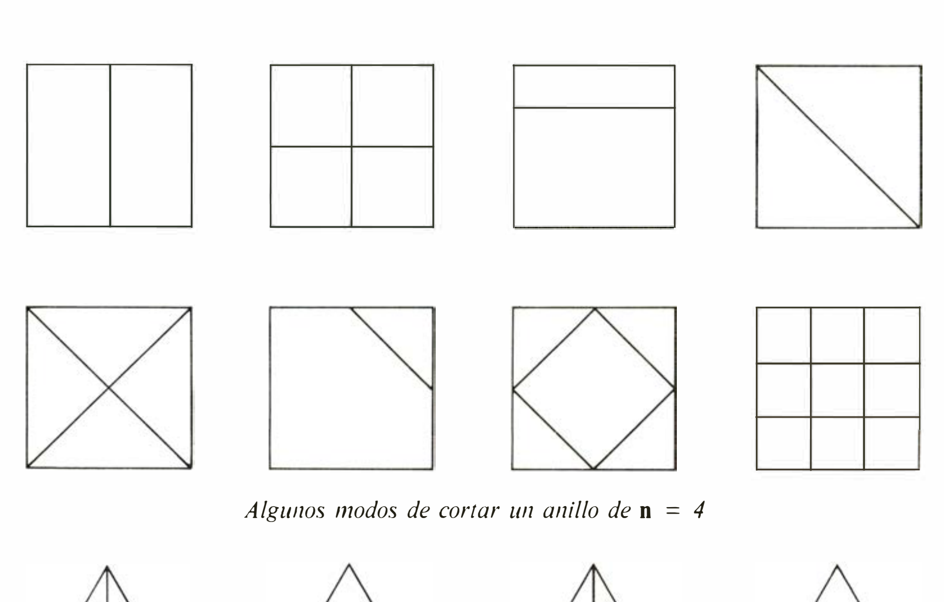
Cuando $k = 2$ el corte forma un anillo único de cuatro caras y ocho pasos de torsión, pero ahora el anillo es solamente de doble longitud que el inicial. Cuando $k = 3$ el corte prosigue una segunda vuelta, produciéndose un único anillo anudado de longitud cuatro veces mayor que el primero, y que tiene cuatro caras y 24 pasos de torsión. Cuando $k = 4$ resultan dos anillos entrelazados, cada uno de ellos de tamaño igual al original y, también, de cuatro caras con cuatro pasos de torsión cada uno.

Los casos correspondientes a $k = 2$ y $k = 4$ pueden realizarse con tiras de papel, no despreciando su espesor y, por tanto, considerándolas sólidas. Como hemos visto, cuando $k = 2$ se tiene la ya familiar banda de Möbius, y cuando $k = 4$ resulta una cinta de papel con dos medias vueltas. Basta cortar las bandas longitudinalmente a la mitad de su anchura, y examinar después los resultados, recordando que los bordes también se consideran caras. Para experimentar con $k = 1$ o $k = 3$ es conveniente disponer de modelos sólidos reales. Como sugiere Charles J. Matthews en el artículo antes mencionado, el método más sencillo de construir tales modelos consiste en utilizar "cerámica de sal": una mezcla de una taza de sal común, media taza de almidón de trigo y tres cuartos de taza de agua corriente. Se pone al baño de María, removiendo hasta que se espese y siga la cuchara. Se deja enfriar en un papel encerado. Se separan los grumos y se da forma a la masa, modelando tiras de unos 20 centímetros de largo por uno y medio de ancho, aproximadamente. Désele después a las tiras la forma del anillo deseado, alisando con agua las fisuras que puedan formarse. Se deja secar el aro. Si se desea, escribe Matthews, pueden pintarse las caras de colores diferentes antes de empezar a cortarlas.

Como hemos visto, los métodos de corte en los casos $k = 1$ y $k = 3$ produci-

n = LADOS POR SECCION TRANSVERSAL \ k = NUMERO DE PASOS DE TORSION	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
3	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3
4	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1	4	1	2	1
5	5	1	1	1	1	5	1	1	1	1	5	1	1	1	1	5
6	6	1	2	3	2	1	6	1	2	3	2	1	6	1	2	3
7	7	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	7	1
8	8	1	2	1	4	1	2	1	8	1	2	1	4	1	2	1
9	9	1	1	3	1	1	3	1	1	9	1	1	3	1	1	3
10	10	1	2	1	2	5	2	1	2	1	10	1	2	1	2	5
11	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	1	1	1	1
12	12	1	2	3	4	1	6	1	4	3	2	1	12	1	2	3
13	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	1	1
14	14	1	2	1	2	1	2	7	2	1	2	1	2	1	14	1
15	15	1	1	3	1	5	3	1	1	3	5	1	3	1	1	5

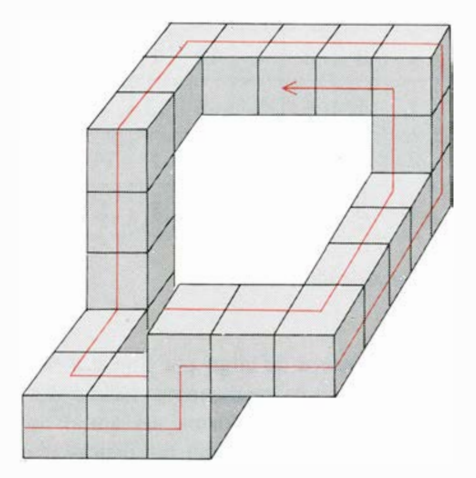
Tabla que muestra el número de caras, conocidos **n** *y* **k**



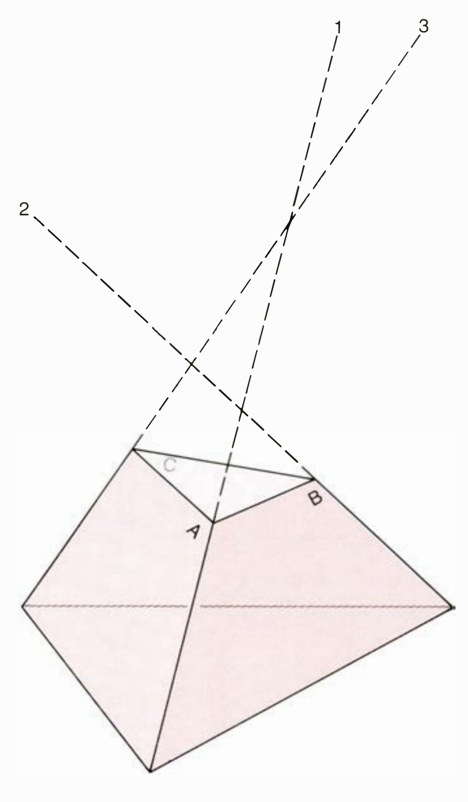
Algunos modos de cortar un anillo de **n** *= 4*

Algunos modos de cortar un anillo de **n** *= 3*

dos por los dos primeros diagramas son iguales. Cuando $k = 2$ o $k = 4$, sin embargo, no son idénticos. También ahora podemos disponer fácilmente de un modelo para el corte doble correspondiente al segundo diagrama con ayuda de unas tiras de papel. Basta para ello poner una tira sobre la otra y darle a la tira doble así formada media vuelta o dos medias vueltas antes de pegar sus extremos. Consideradas como cuerpos sólidos, tales bandas son idénticas a los anillos de dos o cuatro cuartos de vuelta cuya bisección hemos estudiado. Cortar longitudinalmente los aros de papel por la mitad equivale a dar un nuevo corte perpendicular al primero. De esta forma vemos que si $k = 2$ y el anillo se biseca de ambos modos resultan



Anillo prismático de una cara formado con 22 cubos



Poliedro imposible

dos aros entrelazados (uno de ellos da dos vueltas en torno al otro), de cuatro caras cada uno, longitud doble de la inicial y retorcidos ocho veces. Cuando $k = 4$ resultan cuatro aros entrelazados entre sí todos ellos. Son del mismo tamaño que el anillo inicial, y tienen cuatro caras retorcidas cuatro pasos.

Los lectores interesados en el tema podrían investigar qué ocurre para valores más altos de k. Por ejemplo, si $k = 6$, la bisección del anillo produce un solo aro en que se ha formado un medio nudo. También puede ser interesante explorar otros métodos de cortar el anillo de $n = 4$ y el estudio de cuestiones análogas a las expuestas para anillos de sección transversal no cuadrada. Los anillos de sección triángular son fáciles de construir con cerámica de sal; la ilustración inferior de la página precedente muestra cuatro posibles maneras de cortarlos. Resulta demasiado difícil modelar y cortar anillos de secciones pentagonales o todavía más complicadas, pero su estudio es posible, escribe Matthews, ayudándose de diagramas adecuados.

¿Existen fórmulas que a partir de n, de k y del método de corte digan el número de torsiones del anillo o anillos resultantes? Sin duda deben existir, pero no tengo noticia de que haya sido publicado nada al respecto.

Hasta el momento solamente hemos considerado anillos prismáticos de forma circular. Podemos, sin embargo, construir otros anillos parecidos, que llamaremos poliedros toroidales. Lo que hemos venido llamando "caras" del anillo estarán ahora formados por polígonos planos de cuatro lados, unidos a lo largo de sus aristas, resultando una cadena circular. Por ejemplo, la ilustración superior de esta página muestra un anillo prismático ($n = 4$) de este tipo. La ilustración se basa en una fotografía extraída de un artículo dedicado a tales estructuras de Gonzalo Vélez Jahn, del Departamento de Arquitectura de la Universidad Central de Venezuela. El anillo tiene solamente un paso de torsión, y, por consiguiente, se ajusta al modelo de anillo prismático de sección cuadrada de una sola cara (dándole a "cara" el sentido de párrafos anteriores) y una sola arista.

Estos anillos poliédricos prismáticos sugieren multitud de difíciles problemas cuya exploración apenas si ha comenzado. Por ejemplo, Scott Kim ha demostrado cierto número de notables teoremas, todavía no publicados, referentes a los anillos poliédricos. Estas estructuras están fuertemente emparentadas con una clase de "objetos imposibles", como, por ejemplo, el triángulo de Penrose que se muestra en la parte izquierda de la ilustración superior de la página adyacente, y su versión rectangular dibujada a la derecha.

Es concebible que figuras como las anteriores no sean verdaderamente imposibles, sino que sean dibujos de anillos prismáticos poliédricos retorcidos ($n = 4$). En un artículo titulado "Impossible Objects as Nonsense Sentences" (en *Machine Intelligence*, vol. 6, editada por Bernard Meltzer y Donald Michie, 1971) su autor, D. A. Huffman, fue el primero en poner a punto algoritmos que permiten demostrar si tales figuras son o no posibles.

Existen demostraciones informales para ciertas figuras específicas. He aquí, por ejemplo, la demostración de Huffman para la imposibilidad del triángulo de Penrose.

Haremos primero algunas suposiciones razonables:

1. Las líneas rectas del dibujo son líneas rectas del modelo sólido real.

2. Las regiones de aspecto plano en el dibujo son realmente superficies planas del modelo.

3. Las superficies A y B se cortan en la recta 1, las superficies B y C se cortan en la recta 2, y las superficies C y A se intersecan en la recta 3.

Tres planos, en los que ningún par sean paralelos, han de cortarse en un mismo punto P. Por consiguiente cada una de las tres rectas de intersección ha de pasar por P. Observemos, sin embargo, que las rectas 1, 2 y 3 –las tres aristas de intersección– no pueden concurrir en un mismo punto. Por consiguiente, la figura es imposible. Es muy sorprendente que esta sencilla demostración no requiera información alguna sobre las caras o aristas invisibles en la figura. Un razonamiento parecido demostraría la imposibilidad de la "ventana" rectangular.

Kim hizo que me fijara en la figura de la ilustración inferior de esta misma página, uno de los muchos poliedros imposibles sencillos examinados por Huffman. En él, la recta 1 es común a las superficies A y B, la recta 2 es común a la superficie B y a la superficie oculta trasera, y la línea 3 es común a la superficie oculta C y a la superficie A. Razonando de igual manera que antes, estas tres rectas deberían cortarse en un punto común. Pero sus prolongaciones (en línea de trazos) muestran que no es así. Por consiguiente, la figura es imposible. Es extraño, hace notar Kim, que esta figura parezca ser tan claramente posible, en contraste con el triángulo de Penrose, y que la razón de la imposibilidad de ambas sea la misma. Huffman desarrolla un algoritmo, basado en grafos dirigidos, para verificar todas las figuras de este tipo.

El problema de detectar las "ventanas" poliédricas posibles y las imposibles ha sido analizado también por un psicólogo, Thaddeus M. Cowan, aunque utilizando procedimientos diferentes. Basando sus

análisis en la teoría de trenzados, Cowan ha puesto a punto un método sistemático de generar y clasificar tales figuras y de poner de manifiesto diversas propiedades. (Véase "The Theory of Braids and the Analysis of Impossible Figures", en el *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 11, nº 3, agosto de 1974, pags.190–212, y también, "Organizing the Properties of Impossible Figures" en *Perception*, vol. 6, 1977, págs. 41-56.)

Es fácil construir anillos poliédricos prismáticos de sección transversal cuadrada a partir de cubos de arista unidad. Se pueden pegar con goma terrones de azúcar o bloques de madera de juegos infantiles, o también, utilizar cubos plásticos autoadherentes disponibles en casas de material pedagógico. He aquí un delicioso problema sugerido por Kim, que utiliza cubos unitarios. Daré la solución el mes próximo.

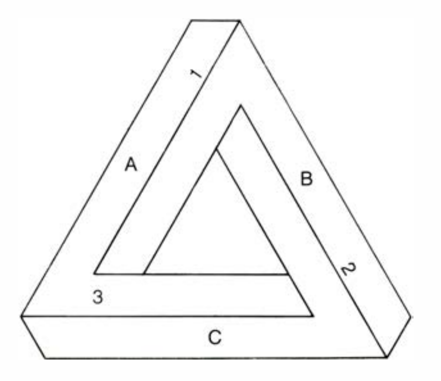
Evidentemente, el anillo prismático de la ilustración superior de la página anterior puede construirse con 22 cubos, como se indica. El problema consiste en dar un modelo de una figura con las mismas propiedades –tener una "cara" y una "arista"– utilizando para ello el mínimo número posible de cubos.

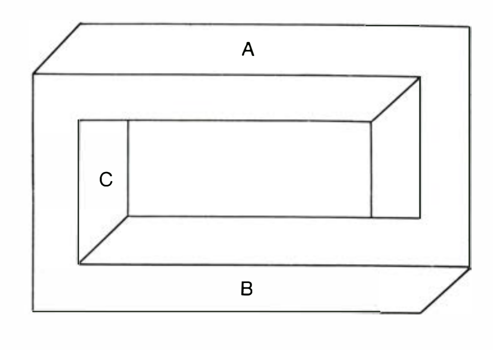
Cada cubo debe tener exactamente dos caras en contacto con otros cubos para poder formar la cadena prismática. Las líneas finas, que indican tales uniones, no forman parte de las aristas del modelo.

La única cara del anillo rodea al toro poliédrico cuatro veces, estando limitada por una única arista que también da cuatro vueltas alrededor del anillo. Pondremos una condición: ningún punto de la arista puede tocar a ningún otro punto de la arista. Tal cláusula tiene la finalidad de evitar que el agujero del toroide pueda quedar parcial o totalmente cerrado.

En la ilustración inferior de esta misma página se muestra un bello modelo de anillo poliédrico, realizado en madera por Ikuo Sakurai, de Tokyo. Una sección del modelo puede retorcerse, adoptando cuatro posiciones. Por el centro de cada cara corre un surco, en el que está prisionera una bolita roja. De esta forma, el modelo puede disponerse de una cualquiera de sus cuatro formas, y después, dándole al triángulo ligeros golpecitos, hacer correr la bolita por el surco, haciéndola dar una, dos o cuatro vueltas al toroide, según el grado de torsión de la sección ajustable.

Howard P. Lyons propuso en cierta ocasión el siguiente anillo prismático: hueco, con una superficie exterior de sección transversal cuadrada con un paso de torsión; el agujero interior, que da una vuelta al anillo, tiene también sección transversal cuadrada con un paso de torsión, pero ahora la torsión es de sentido contrario. En una carta que me escribió, Lyons se preguntaba qué propiedades tendría tan curioso anillo. En este caso me voy a apoyar en Mark Twain. En cierta ocasión respondió a un individuo que le había hecho una pregunta insólitamente complicada sobre la velocidad de una bala de cañón escribiéndole: "No sé".





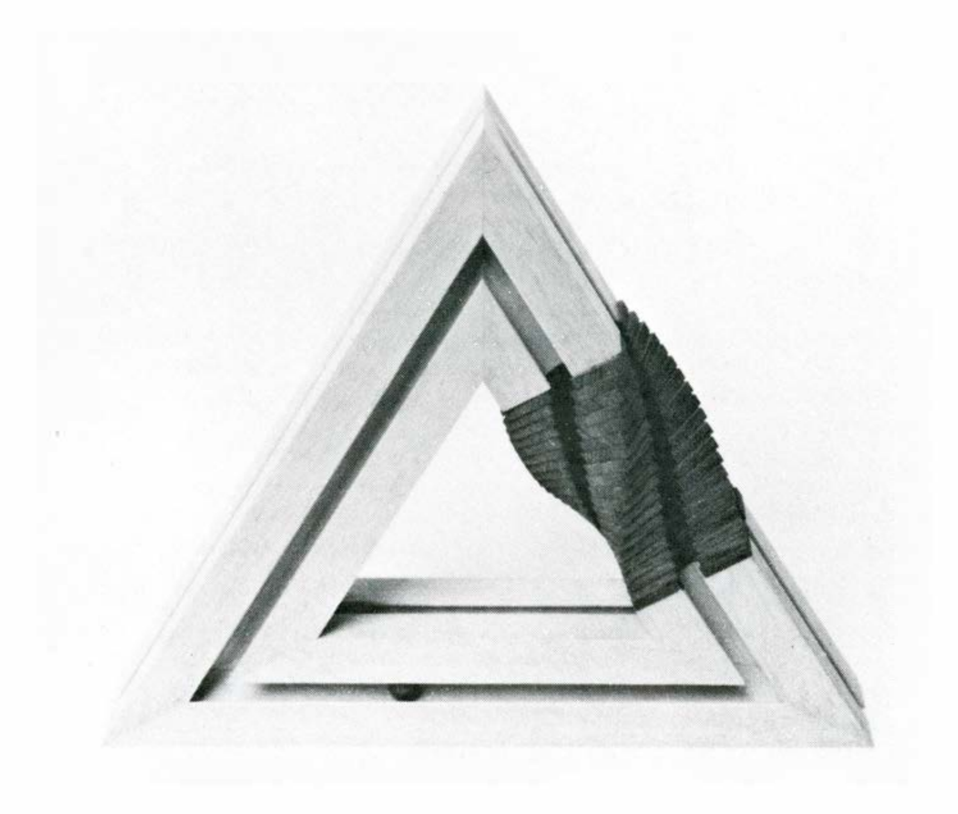
Dos anillos poliédricos prismáticos imposibles

El problema de los 27 dados, presentado en el número de abril de *Investigación y Ciencia*, consistía en construir un cubo con 27 dados, de manera que la suma de los 54 productos de los 54 pares de caras en contacto sea (1) mínima y (2) máxima.

Cuatro lectores han encontrado resultados que, casi con certeza, son soluciones del problema: el mínimo es 294 y el máximo, 1028. Tales soluciones se muestran en la ilustración de la izquierda. El mínimo es único, excepto por dos posibles orientaciones del dado central. El máximo tiene numerosas variantes.

El primer lector que envió soluciones correctas fue Kenneth Jackson. Su programa de computador no era exhaustivo, y, por consiguiente, no podía garantizar que sus soluciones fuesen mínimos o máximos absolutos. Otro programa, debido a Paul Stevens, posee también esta característica. Las mismas soluciones fueron halladas a mano, sin demostración, por Leonard Lupow.

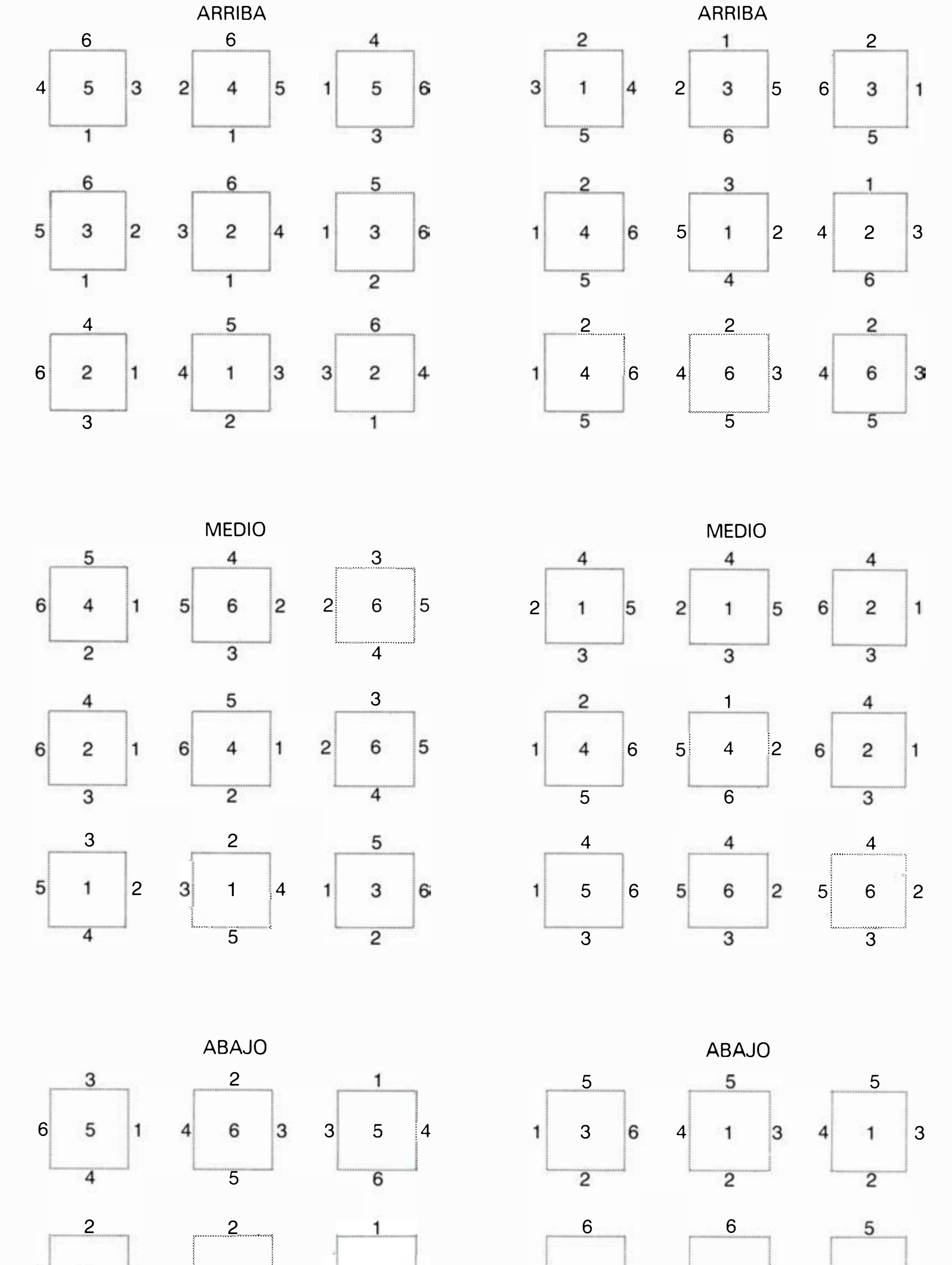
Dave Vanderschel intentó inicialmente resolver el problema mediante computador. Tras encontrar espantosas dificultades para preparar un programa capaz de examinar todos los casos en un lapso de tiempo razonable, se decidió por resolver a mano el problema, y, finalmente, encon-



Modelo japonés de poliedro tórico, ajustado para mostrar una sola cara y una sola arista

tró una demostración, larga y complicada para los números 294 y 1028, que en su opinión no tiene fugas.

Todavía estoy recibiendo cartas de excepcional interés sobre los números de Bell (*Investigación y Ciencia*, julio de 1978). Había entonces suscitado la cuestión de si el conjunto de números de Bell que son primos es finito o infinito. Muchos lectores han señalado que además de los tres primeros números de Bell primos, B_2, B_3 y B_7, el 13–ésimo Bell, de valor 27.644.437, también es primo. Vaughan Pratt, del Laboratory for Computer Science del Instituto de Tecnología de Massachusetts, echó por tierra la conjetura de que todos los números de Bell primos tienen subíndices primos. Utilizando un programa propio muy rápido, ensayó hasta B_{161}, que es un número de más de 200 dígitos, encontrando así los dos números primos de Bell siguientes, B_{42} y B_5. Pratt opina que hay infinitos números de Bell primos, pero que a lo sumo llegará a conocer uno más en lo que le queda de vida. Así, B_{42} tiene 38 dígitos; B_{55} tiene 54. Incidentalmente, la afirmación mía de que B_{100} tiene 126 dígitos es incorrecta. La cifra correcta es 116.

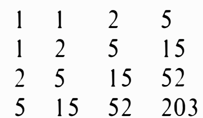


El problema de los 27 dados. Mínimo, 294 **(a la izquierda)**; *máximo, 1028. No se indica la puntuación de la cara inferior de los dados*

Sin Hitotumatu, que traduce la sección de juegos matemáticos para la revista *Saiensu*, versión japonesa de *Scientific American*, me ha proporcionado más detalles sobre los diagramas de Lady Murasaki. Hacia el año 1600, las damas y caballeros japoneses eran aficionados a un juego llamado Genji-ko o Monko. Un árbitro extraía al azar barritas de incienso de un recipiente que las contenía de cinco clases diferentes. Los jugadores olían las barritas de ignición, y tenían que averiguar cuáles eran de la misma clase y cuáles, diferentes. Las 52 posibles maneras de seleccionar las barritas se representaron en un diagrama como se explicaba en el artículo de julio.

A principios del siglo XVII los matemáticos japoneses le dieron nombres mnemónicos a los diagramas, utilizando los títulos de los 52 capítulos (entre el primero y el último) del *Tale of Genji* de Lady Murasaki. No se sabe si la correspondencia de diagramas y capítulos se hizo al azar o si se fundamentó en alguna regla o si tiene alguna relación con los sucesos y personajes de cada capítulo. A finales del siglo XIX, las ediciones impresas de la novela empezaron a llevar los diagramas de Murasaki en el encabezamiento de cada capítulo.

Andrew Lenard, de la Universidad de Indiana, ha comunicado haber tenido éxito en la demostración de la siguiente y curiosa propiedad de los números de Bell. (La propiedad había sido observada ya, pero no había sido demostrada.) Los 2 n primeros números de Bell pueden disponerse en matriz cuadrada, que para $n = 3$ resulta:



1	1	2	5
1	2	5	15
2	5	15	52
5	15	52	203

¿Cuánto vale el determinante de esta matriz? Viene dado por una fórmula sorprendentemente simple: $(1!)(2!)(3!)...(n!)$. En este caso, 203 es el sexto número de Bell; $n = 3$ y la fórmula nos dice que el valor del determinante resulta equivalente a $1 \times 2 \times 6 = 12$.

A los lectores que gusten de resolver "criptarrimas" del tipo SEND + + MORE = MONEY, les agradará el libro en rústica de Steven Kahan titulado *Have Some Sums to Solve*. Acaba de ser publicado por la Baywood Publishing Company, de Farmingdale, N. Y.

Taller y laboratorio

Ideas sobre cómo pulir cristales a mano y cómo mejorar la eficacia de las chimeneas caseras

Jearl Walker

Aunque la industria óptica tiene una maquinaria muy avanzada con la que pulir cristales para la fabricación de lentes y espejos, muchos aficionados a la óptica instrumental prefieren pulir sus cristales a mano. La técnica empleada se llama pulido con abrasivo libre, y consiste en restregar un objeto duro, con un movimiento al azar, sobre un lecho fino de arenilla abrasiva, que está situado sobre el objeto a pulir. Normalmente se empieza empleando una arena gruesa y, progresivamente, se va cambiando a tamaños de arena más fina hasta conseguir que el objeto a pulir tenga el tamaño, la forma y la lisura deseada.

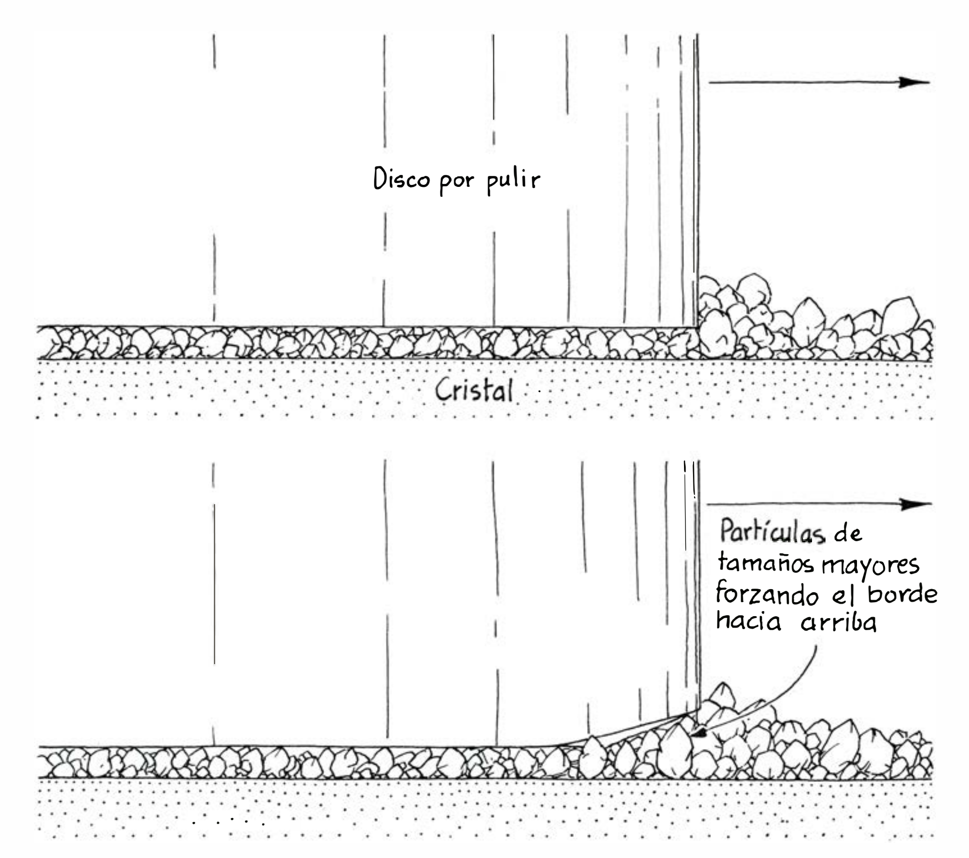
La técnica de pulir presenta dos paradojas interesantes. La primera: ¿Cómo puede, al pulirse una superficie, conseguirse una lisura tal que el objeto pulido sea tan ópticamente bueno que se pueda utilizar como telescopio? Para su resolución hubo que esperar a que se aceptase la naturaleza ondulatoria de la luz; y la respuesta estriba en el cambio de tamaño de la arena que se emplea al pulir. Como antes dijimos, se va progresivamente disminuyendo el tamaño de la misma. Hay una relación muy estrecha entre el tamaño de la arena y la lisura que se obtiene en la superficie del material a pulir. De ahí que se deba ir reduciendo el tamaño del medio abrasivo, durante la operación, hasta que se llegue a un tamaño igual o menor que el de la longitud de onda de la luz, y entonces se obtendrá una superficie lisa y ópticamente correcta.

La segunda paradoja, según tengo entendido, sólo ha sido explicada muy recientemente; en realidad, queda aún mucho trabajo por hacer para confirmar su absoluta comprensión. La cuestión es la siguiente: ¿cómo puede evitarse que el objeto a pulir se raye, teniendo en cuenta que en la distribución de tamaños de cualquier mezcla abrasiva existen por lo menos dos órdenes de magnitudes de los granos, de manera que la mezcla, con seguridad, contendrá algunas partículas relativamente grandes que podrán rayar la superficie del cristal? El pulido con abrasivo libre parece que ha llegado a tener mucho de arte, que depende en gran parte de la experiencia del pulidor y de su sentido del tacto. Quizá por ello, poca gente ha investigado la causa de que no se rayen los cristales.

Recientemente, Edward J. Saccocio, de Columbus (Ohio), desarrolló una idea que parece explicar esta segunda paradoja, al menos en parte. El éxito del pulido con abrasivo libre depende, a buen seguro, de la forma del borde del objeto que se mueve sobre la capa de arena. Normalmente, el utensilio que se emplea está hecho de un metal o de un cristal tanto o más duro que el material que se quiere pulir. Entre ambos colocó una suspensión de arena con agua. Saccocio encontró que el borde frontal del objeto de arriba, es decir del instrumento que pule, determina el tamaño de las partículas que pueden pasar al espacio entre el objeto a pulir y el instrumento pulidor.

Si el borde es cortante, las partículas mayores entrarán con mayor dificultad en el espacio entre el instrumento y el objeto a pulir que si el borde estuviera redondeado. La altura del espacio ocupado por la sílice depende grandemente del tamaño medio de la arena. El rayado se produce cuando una partícula con un tamaño muy superior a la media se introduce en el espacio antes aludido, ya que se clava en una de las superficies y origina una raya en la otra. Por tanto, un instrumento con el borde delantero cortante o afilado producirá, por término medio, menos rayas que otro que tenga el mencionado borde romo o redondeado, ya que ello permitirá que las partículas de tamaños mayores se introduzcan debajo del instrumento pulidor.

Para probar estas ideas sobre las causas y el modo de evitar la formación de rayas, Saccocio diseñó varios experimentos sen-



Incidencia en el pulido de la forma del borde delantero, según sea afilado o redondeado

cillos. Yo los repetí, y el lector puede hacer otro tanto. Aunque también puede usar dichos experimentos como base para posteriores ensayos que le permitan seguir investigando las causas del rayado. El material elegido para ser pulido era un disco de molibdeno (bronce o latón podría ser más conveniente para el lector), como material más duro empleó cristal, y la arena abrasiva era óxido de aluminio, en tres tamaños nominales: 30, 15 y 3 micrometros. El objeto de molibdeno era un cilindro corto de 15 milímetros de diámetro, y se le hizo mover sobre un gran plato de cristal, de forma inversa a como normalmente se trabaja al pulir.

Extendió una arena abrasiva sobre una porción del plato de cristal, a fin de tener un agente pulidor para el disco de molibdeno. Saccocio mezcló el óxido de aluminio con agua para obtener así una suspensión, que es lo que normalmente se emplea en el pulido con abrasivo libre, aunque yo usé arenilla seca. Primero se dejó lisa y sin rayas la superficie del molibdeno, puliéndola con arena de cada uno de los tres tamaños antes citados, usándolos en orden descendente. Moví el cilindro sin rumbo predeterminado sobre la arenilla, aplicando una presión tan uniforme como me era posible. Una de las dificultades del experimento, cosa que requiere experiencia, es determinar qué presión es la adecuada. Una presión demasiado ligera alarga el tiempo necesario para pulir y una presión demasiado grande provoca la aparición de rayas.

Tuve que cambiar la arenilla abrasiva frecuentemente con el fin de evitar el rayado. Quizás esto era debido en parte a que trozos de metal que se habían desprendido del disco contaminaran la arenilla. Además, la cantidad de arenilla situada debajo del disco parecía disminuir.

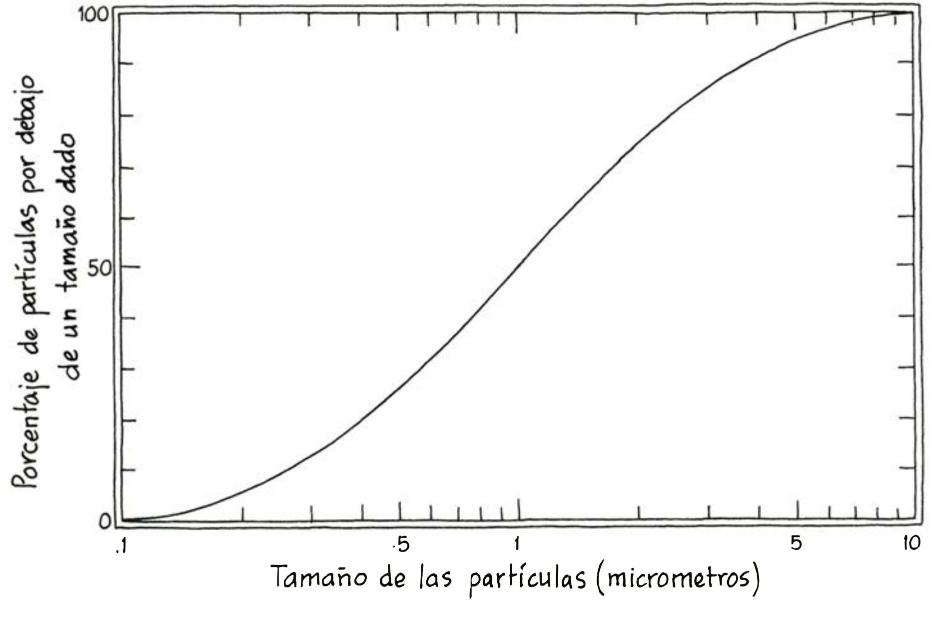
¿Por qué se producían las rayas? Según parece, cuando se aplica una presión excesiva, las partículas no pueden rodar ni girar suavemente entre las dos superficies en movimiento, mientras que las pequeñas porciones de material desprendido y las grandes partículas de la arenilla abrasiva se clavan en una de las dos superficies, rayando la otra. Saccocio cree que esta incrustación ocurre cuando las dos superficies forman entre sí un ángulo determinado, lo cual sucede si la presión no se aplica uniformemente o si el pulido ha devastado ya las superficies que toman formas cóncavas o convexas. Yo mismo podía sentir cuándo una raya comenzaba a formarse: el disco daba un ligero tirón y el sonido del pulido cambiaba notablemente. Con una presión apropiada, las partículas abrasivas pulían la superficie del molibdeno que bien se desprendían molécula a molécula, o bien en trozos de sección en formas de cráteres tan pequeños que no se podían ver. De cualquier manera la abrasión se limitaba a la zona superficial.

Siguiendo las directrices de Saccocio, comprobé la idea de que las partículas mayores eran las que provocaban el rayado. Puse cierta cantidad de arenilla de 30 micrometros en una arenilla que estaba compuesta por los otros dos tamaños más pequeños. Comencé a pulir el disco sobre una zona donde la arenilla no estaba mezclada con la de tamaño superior; luego, sin levantar el disco, lo llevé a la zona donde la arenilla tenía la mezcla con la de tamaño superior. Cuando en esta zona había cantidades iguales de arenilla de los dos tamaños, mezclados de la manera más homogénea posible, el rayado no fue más frecuente de lo que era natural. Pero repetí el experimento poniendo menos cantidad de arenilla del tamaño de 30 micrometros, manteniendo la misma cantidad de arenilla fina; y el rayado pareció hacerse más frecuente.

En cada uno de los ensayos procuré mantener aproximadamente la misma presión sobre el disco. Seguramente, algunas variaciones que se producían en la frecuencia del rayado eran debidas a que no conseguí hacerlo con la suficiente precisión. Resulta bastante claro que si las partículas grandes estaban presentes en una pequeña porción, ellas eran probablemente las causantes del rayado. Al parecer, en tales casos, la abertura existente entre el disco y el cristal depende en buena medida de la arenilla más pequeña. Si las partículas entran en dicho espacio, deben forzar el disco hacia arriba. Como entonces el disco quedaría apoyado en menos sitios, los puntos de contacto de dichas partículas grandes deben soportar una presión mayor. Esa presión mayor en los pocos sitios donde están las partículas grandes es la que hace que dichas partículas se claven y rayen las superficies.

A continuación me puse a restregar el disco solamente en una dirección. A cada uno o dos movimientos, levantaba y soplaba la superficie del disco para quitar la arenilla y poder examinarla. De esta manera pude conocer dónde comenzaba el rayado y dónde se detenía. Algunas de las rayas se iniciaban en los bordes delanteros del disco, otras, en lugares indistintos dentro del perímetro del mismo. Y otras se diría que comenzaban con un surco bastante ancho y luego se estrechaban. Este estrechamiento podía deberse a la fractura de la partícula que estaba causando la raya. Otros surcos parecían mantener aproximadamente la misma anchura al menos cuando los observaba con una simple lupa. Todos los surcos eran notablemente más anchos que las partículas. Se puede suponer que la punta de una partícula abrasiva está clavada en una superficie en movimiento y que en el transcurso del movimiento ulterior aprieta y distorsiona una amplia área de esta superficie antes de que la distorsión sea lo suficientemente grande para rasgarla. Es posible que algunas rayas puedan ser estrechas al principio y luego ir aumentando en anchura si la partícula abrasiva va cavando progresivamente la superficie en movimiento, si bien no he podido encontrar ninguno de esos trazos.

El hecho de que algunas rayas se den en los bordes y otras en el interior se debe, quizás, al azar. Las partículas que provocan las rayas no están redondeadas (probablemente no rayarían si así fuera); muy al contrario, tienen puntas afiladas. Es



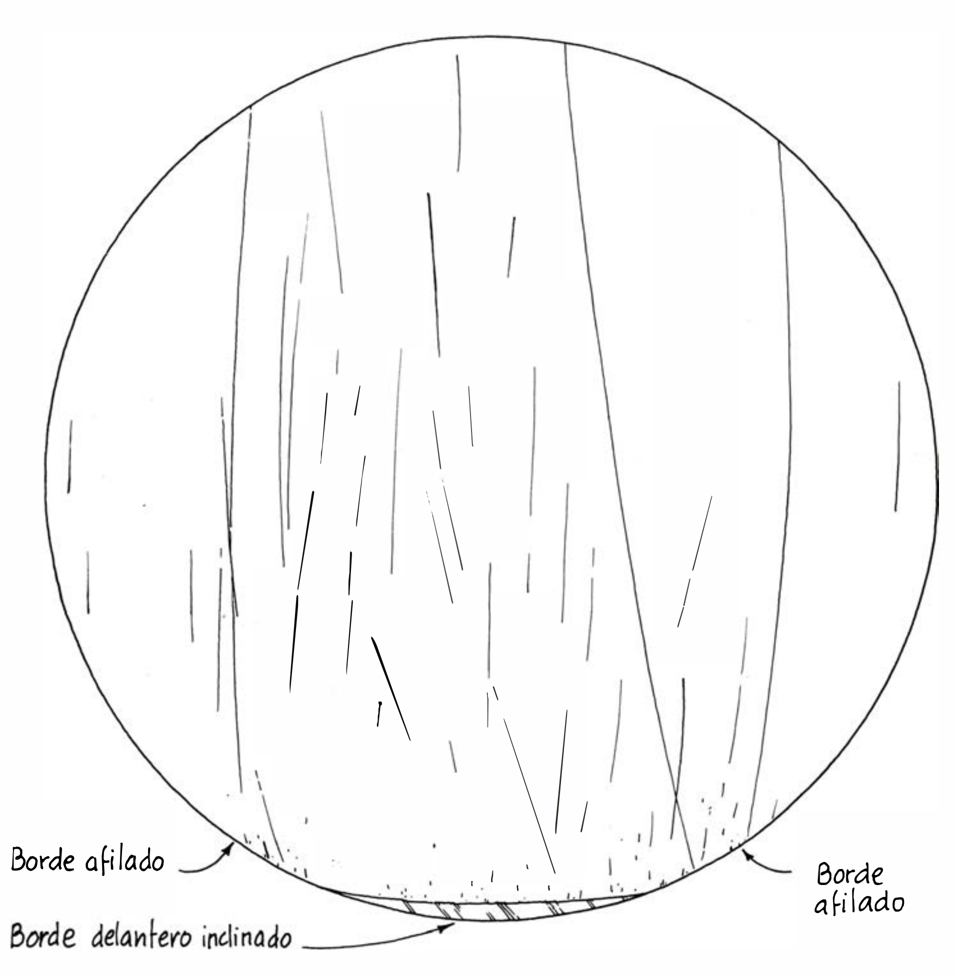
Distribución, por tamaños, de las partículas en una arenilla de un micrometro

una cuestión de suerte el que una de dichas partículas gire tomando una determinada orientación, en la que una de sus caras se clave y la otra raye. Un determinado grado de azar debe introducirse también en razón del movimiento aleatorio y la presión que se aplica al disco. Ocasionalmente, debí apoyarme más sobre un lado del disco, subiendo así la posibilidad de que se rayara más de ese lado.

Para probar el efecto del borde delantero sobre la frecuencia del rayado, Saccocio ideó varios experimentos con el disco de molibdeno encajado (excepto por la parte de superficie a pulir) en un material de plástico duro o resina. En el borde delantero había un anillo de plástico que rodeaba todo el perímetro de la superficie de molibdeno. El anillo tenía una inclinación de tres a cinco grados, situado de manera que su parte exterior estaba más lejos del cristal de base que la parte interior, que era la que se hallaba junto a la superficie del molibdeno. Saccocio hizo este pulido empleando suspensiones de arenilla de tamaño uniforme, y encontró que, con el borde delantero inclinado, la superficie de molibdeno se rayaba más que cuando otro disco de molibdeno (sin estar encajado en plástico) con el borde delantero afilado se restregaba sobre la misma suspensión de arenilla. De nuevo resultaba que era muy difícil aplicar la misma presión en los dos casos, lo cual nos podía conducir a resultados falsos. No obstante, Saccocio creyó que la diferencia en la frecuencia de rayado era de alguna manera debida a la forma del borde delantero. La inclinación de dicho borde aumentaba la posibilidad de que las partículas mayores responsables de la aparición de rayas se introdujeran en el espacio entre el disco y el plato de cristal.

Yo mismo repetí este experimento, pero añadiendo a una y a otra arenilla fina algunas partículas de 30 micrometros y encontré en general los mismos resultados. Tambien realicé los ensayos con un disco de molibdeno sin soporte de plástico, que tenía una parte de su borde inclinada intencionadamente mientras el resto del borde seguía estando afilado, restregando el disco en una sola dirección sobre la arenilla, primero con el borde delantero afilado y después, una vez inspeccionado, con el borde delantero inclinado. Aunque los resultados variaron, en general, estaba de acuerdo con los de Saccocio.

Advertí, asimismo, una curiosa forma de rayarse que a veces aparecía cuando el borde delantero estaba inclinado. Las rayaduras solían darse a los lados del borde inclinado más que directamente detrás de él. Si esta forma es realmente característica (se requerirán muchos ensayos para demostrar que ello es así) debe ser a causa de que el disco frota sobre una cresta central de partículas de gran tamaño rodando desde el borde inclinado y cruzando diametralmente hacia la parte de atrás. Por el borde inclinado entra una cantidad de partículas de gran tamaño mayor que por el borde afilado, y esta selección tiende a engrosar el centro del disco. Luego, debí empujar inadvertida y fortuitamente más sobre un lado que sobre otro provocando que el disco girara alrededor de la cresta central. Al haber en los lados menos partículas grandes que en la cresta central, el incremento de la presión sobre uno de los lados provoca más rayas en él que en la cresta central.



Tipo de rayas en un disco con el borde delantero ligeramente inclinado

Mucho más se podría hacer sobre estos experimentos. El lector podría obtener más datos sobre el sistema molibdeno/cristal, y también podría ensayar otros abrasivos (tanto en seco como en húmedo) y otros materiales pulidores tales como cristal (sobre cristal), aluminio, cobre, bronce y plomo. Los datos podrían interpretarse más fácilmente si se normalizara la presión aplicada sobre los objetos. Se puede ensayar colocando un peso conocido sobre el disco y restregando luego el disco a través de la suspensión al empujar horizontalmente el disco y el peso. Para un tamaño de arenilla dado, ¿hasta qué punto depende la frecuencia del rayado del peso aplicado? Puesto que el rayado es aleatorio, el lector necesitará muchos datos, estadísticamente bien interpretados, para responder a esa cuestión.

Cuando coloqué en un principio mi disco de molibdeno sobre la arenilla, había debajo de él partículas de todos los tamaños. Una vez que se ha pulido durante un rato, ¿siguen permaneciendo debajo del disco partículas de todos los tamaños o de alguna forma el proceso de pulido destruye las grandes partículas mientras que el borde afilado evita que entren las mayores en el espacio de debajo del objeto? ¿Por qué debía reponer la arenilla para evitar las rayaduras? Cuando pulía durante un rato con arenilla de 15 micrometros, el plato de cristal se volvía opaco al cubrirse con un polvo finísimo que, al parecer, hacía decrecer la frecuencia de los rayados. ¿Se obtenían esos mejores resultados porque entonces el disco se encontraba más próximo del cristal y, por tanto, las partículas grandes hallaban más dificultades para entrar en el espacio intermedio?

La chimenea doméstica es uno de los sistemas más comunes y antiguos para calentar las casas. El calor de la chi-

menea llega a la habitación, principalmente, por uno de los tres tipos de transferencia de calor existente: convección, conducción y radiación. Por convección es poca la cantidad de calor que llega a la habitación, ya que el aire caliente se pierde por la chimenea. Por conducción difícilmente podría entrar algún calor, ya que para ello sería necesario contacto directo, mediante objetos sólidos, entre el fuego del hogar y la habitación. Casi la totalidad del calor llega a la habitación por radiación, principalmente radiación en la zona del infrarrojo, viniendo la mayoría de esta radiación de las brasas calientes directamente, y no de las llamas, en contra de lo que podría creerse; esa es la razón por la que el fuego calienta realmente sólo después de haber quemado suficiente madera para formar las brasas.

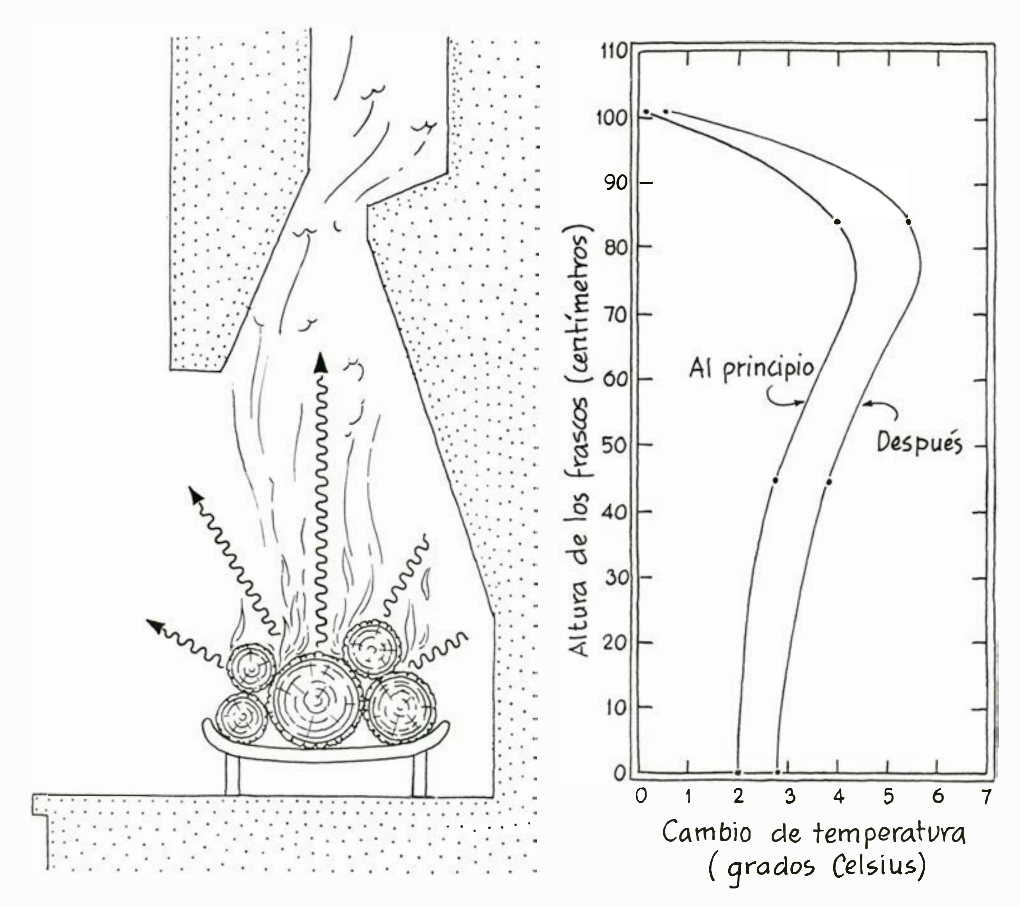
La chimenea está considerada como una fuente ineficaz de calor, debido a que sólo una pequeña cantidad de la energía liberada por el fuego llega realmente a la habitación. Incluso parte de esta energía es a menudo desperdiciada por haberse puesto de moda colocar delante del fuego una pantalla de cristal para evitar que caigan chispas de la lumbre a la habitación. La pantalla casi nunca está diseñada para dejar pasar las radiaciones de la zona del infrarrojo.

La conservación de la energía tuvo que convertirse en un tema de interés general para que alguien se le ocurriera mejorar la eficacia de las chimeneas. Lawrence Cranberg, un físico de Austin, Texas, comenzó investigando la forma de colocar los leños en el hogar. Llegó a la conclusión de que la forma convencional de hacerlo (normalmente tres, formando secciones triangulares) no era demasiado buena, porque se manda hacia arriba la mayor parte de calor producido y, por tanto, se pierde al calentar los ladrillos de la propia chimenea o se escapa con los gases por la chimenea arriba. Cranberg llamó también la atención sobre el hecho de que las brasas, responsables de la mayor parte del calor radiado, no están bien encaradas hacia la habitación sino que se encuentran ocultas por leños sin quemar. Así, la gente, cuando quiere calentar suficientemente una habitación, de lo único de que se preocupa es de colocar los leños de forma que produzcan mucha llama, con lo cual sólo se consigue que se consuma de prisa.

Para evitar esta pésima forma de aprovechar las radiaciones, Cranberg diseñó un nuevo tipo de parrilla para chimeneas que mantiene los leños en una disposición en forma de línea ("Slot design"). Su idea era que si mantenemos el fuego dentro de un hueco, rodeado por troncos, el área expuesta de las brasas ardiendo podría incrementarse mucho, y el calor radiado podría emitirse por el hueco hacia dentro de la habitación (y no hacia la chimenea). Dado que el calor radiado podría producirse con una eficacia mayor, el combustible podría quemarse, por tanto, más lentamente, con menos llama viva y mejor exposición de las brasas hacia la habitación. El hueco podría incluso ser parcialmente autocontrolable, de manera que consiguiera mantener una distribución uniforme de la radiación, ya que si el hueco se ensanchase en algún punto, en ése el hueco radiaría más calor, y la temperatura local de la zona podría descender ligeramente. Con el tiempo, el resto del hueco podría ampliarse en el mismo grado.

Yo mismo ideé un experimento para comprobar cómo se distribuyen las radiaciones emitidas por la parrilla convencional, con los troncos amontonados sobre ella, y por el diseño de hueco. A falta de detector de infrarrojos, decidí comprobar la distribución del calor irradiado con una simplísima disposición de frascos llenos de agua con sendos termómetros en su interior. Coloqué enfrente de la chimenea cuatro frascos a diferentes alturas sobre el suelo, pero todos en la misma vertical. Los frascos eran del tipo Erlenmeyer, de 250 mililitros y contenían 200 mililitros de agua. Introduje un termómetro tipo Celsius en cada frasco y, para evitar las posibles pérdidas por evaporación, cerré la boca de cada frasco rellenando la abertura con material plástico de envolver alimentos. Parte de las radiaciones infrarrojas





Disposición de los frascos para medir la distribución de radiaciones, a partir de una parrilla convencional

emitidas por el fuego podrían ser absorbidas por el agua de los frascos, con lo que ésta se calentaría. Pude controlar la temperatura con los termómetros y tener así una idea aproximada de cómo se distribuía la radiación en el plano vertical a partir de un determinado fuego.

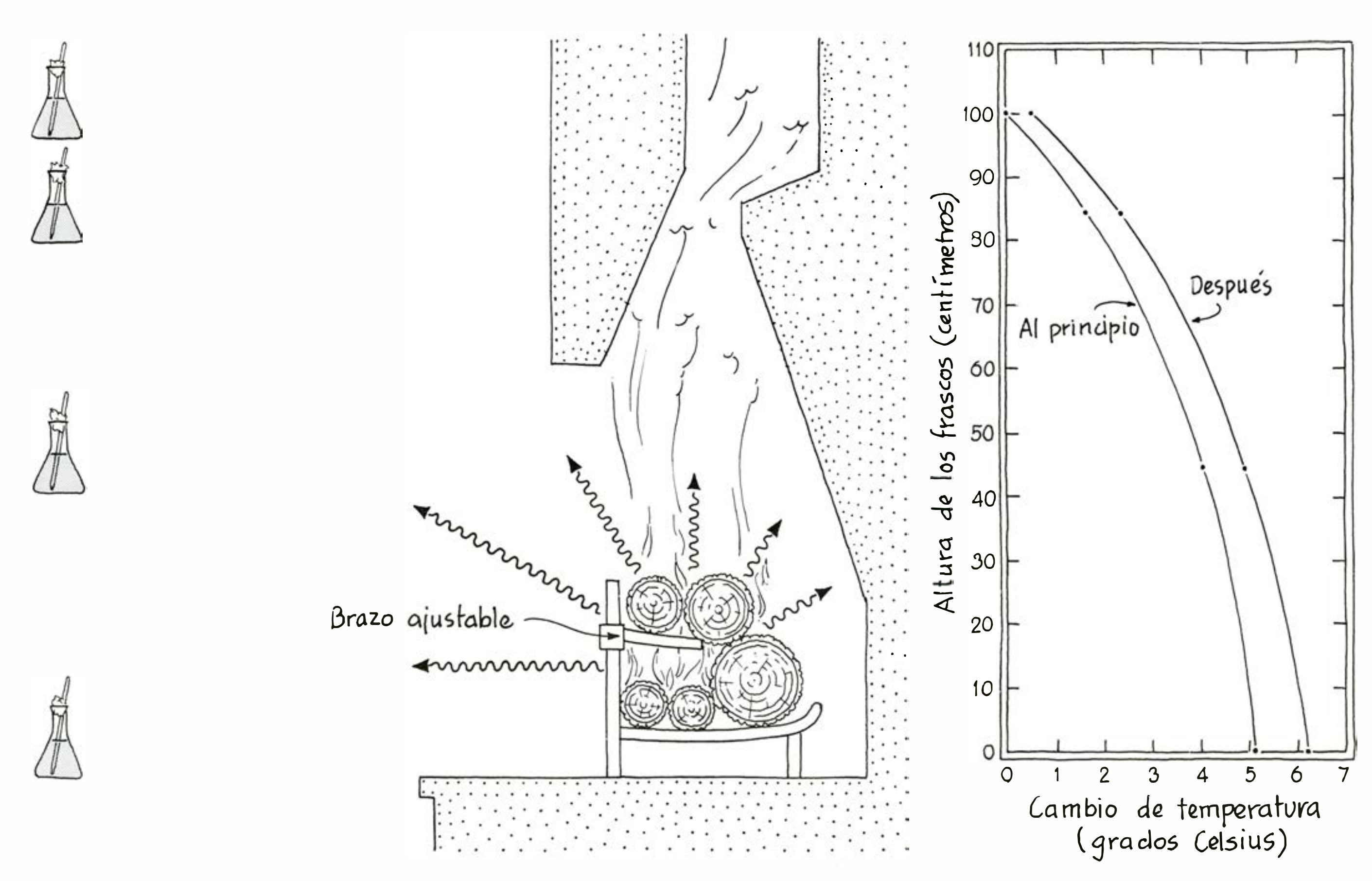
Uno de los inconvenientes de este método es que el calentamiento del agua va siempre con retraso respecto a cualquier incremento en la intensidad de las radiaciones del fuego. Pero me importaba menos ver cómo variaban las emisiones de radiación en función del tiempo, que estudiar cómo variaban en función de la altura. Es decir, supuse que la forma general de distribuirse las radiaciones por la habitación podría determinarse, de forma aproximada, controlando la temperatura del agua en los frascos.

Procuré que, en los dos tipos de fuegos, se empleara el mismo tipo y tamaño de leño. Los tamaños los elegí siguiendo las recomendaciones que Cranberg me envió: debía haber un leño grande, de unos 15 centímetros de diámetro, en la parte posterior del hueco, uno o dos leños, de tamaño medio, en la parte de arriba, y dos más pequeños al fondo. Aunque mi madera era toda del mismo tipo, no sabía de qué clase era. A pesar de mi interés por conseguir que los tamaños de los troncos fueran iguales en los dos fuegos, esto sólo pude conseguirlo de forma aproximada, ya que los troncos distan mucho de ser piezas normalizadas, como los componentes de una máquina. Por lo demás, no pensaba que los resultados del experimento dependieran críticamente del tamaño de los troncos. Sin embargo, la cantidad de calor irradiada hacia la habitación por un fuego montado de acuerdo con el diseño de Cranberg sí podía aumentarse grandemente colocando un gran tronco en la parte de atrás de manera que el hueco formado fuera más ancho.

Puesto que sólo quería comprobar la forma en que se irradiaba el calor, decidí no controlar la temperatura ambiente de la habitación. Además, la temperatura del aire variaría verticalmente, ya que el aire caliente asciende; por otra parte, dicha temperatura dependería también de las dimensiones de la habitación y de su volumen, y por ello podría ser difícil tener un valor representativo. Así las cosas, decidí controlar la temperatura de los frascos, cada cinco o diez minutos, una vez que encendí el fuego. Durante el experimento dejé parcialmente abierta la puerta de la habitación, para que corriera una ligera brisa fría que ayudara a mantener constante la temperatura ambiente. Encendí los dos fuegos la misma tarde, con el fin de evitar que la posible variación de la temperatura de la calle influyera en el experimento al provocar un mayor o menor tiro a través del conducto de la chimenea. De todas maneras, a lo largo del experimento se produjo seguramente alguna variación en la temperatura exterior, ya que dicha temperatura va descendiendo progresivamente en el atardecer.

Comencé con la disposición convencional de los troncos, controlando la temperatura del agua durante una hora. Los cambios de temperatura más característicos se indican en el gráfico de la página opuesta. La cantidad de radiación tenía su intensidad máxima en el frasco que estaba situado a 84 centímetros del suelo, era casi cero en el frasco de arriba, situado a 101 centímetros y estaba por debajo del valor máximo en los otros dos frascos. Al parecer, el calor es radiado con intensidad hacia fuera, pero no demasiado horizontalmente. Evidentemente, el frasco de arriba recibe poca radiación debido, en parte, a que está en cierto modo tapado por la protección de la construcción de la chimenea, y también debido a que el área de la sección perpendicular que este frasco presenta al fuego es menor que la que presentan los otros frascos. La mayor parte del calor irradiado parece estar dirigido hacia arriba. Tal como Cranberg suponía, la mayor parte de dicho calor se perdía por los ladrillos que formaban la protección de la chimenea y por el propio conducto de humos.

Una vez hecho el experimento anterior, sustituí la parrilla convencional por el di-



Distribución de las radiaciones medidas a partir de una parrilla con diseño en forma de hueco

seño en forma de hueco, coloqué leños nuevos y encendí el fuego. Traté de que los troncos estuvieran en el montón uno pegado al otro con el fin de evitar agujeros o aberturas en la disposición en forma de hueco. El tipo de parrilla motivo de la patente es utilísimo para ello, ya que los brazos que soportan los troncos superiores son ajustables en altura, de manera que dicho tronco puede colocarse encima del tronco posterior. Los brazos ajustables también son útiles para controlar la velocidad de la combustión, ya que dicha velocidad se puede ajustar variando la altura del hueco. El consumo de leña era más lento con esta disposición y las llamas aparecían solamente en los troncos pequeños inferiores, uniformes a lo largo de toda la sección longitudinal del hueco, por lo que no era necesario girar ni remover los troncos. Los troncos de arriba se carbonizaban parcialmente por la parte que estaba mirando el hueco, y el que se apoyaba en el tronco trasero ardía vivamente con brasas rojas. El tronco trasero estaba totalmente al rojo por el lado del hueco. Se puede decir que se había conseguido una perfecta disposición, ya que poca era la cantidad de madera que se quemaba con inútiles llamas. Por el contrario, todo se quemaba carbonizándose, produciendo, por tanto, gran cantidad de radiaciones caloríficas.

De nuevo, y más o menos durante una hora, controlamos el calor irradiado. En esta ocasión, el perfil vertical de temperatura presentaba el máximo aproximadamente al nivel del suelo. Como Cranberg habia previsto, el hueco enviaba la radiación directamente hacia la habitación. Hacia arriba, en dirección del frasco superior, apenas sí se emitía radiaciones. Por ello, del total del calor irradiado, poco se perdía por los ladrillos de la mampostería de la chimenea y también poco se iba de la habitación por el conducto de humos.

La forma en que el calor se irradia a partir de este diseño en "hueco" se puede determinar fácilmente incluso con la mano. Puse la mano frente al fuego a la altura del suelo; la elevé directamente hasta una altura mayor que la de los troncos superiores. El calor que sentí en la primera posición era mucho mayor que en la segunda.

La concepción de Cranberg sobre cómo se irradiaba el calor desde su sistema de colocar y mantener los troncos era correcta. Es posible que alguien quiera experimentar variando la altura de los brazos, la altura del hueco y la longitud de los troncos. También podría medir la forma de radiación y la variación de su intensidad con el tiempo comparando dos tipos de hogueras de leños. ¿Producirá siempre el diseño tradicional menos radiaciones que el nuevo? ¿Cómo sería la producción de calor a partir de un fuego en hueco en función del tamaño del tronco posterior y de la altura del hueco? (Para llevar a cabo los experimentos con resultados válidos, debe tenerse presente que los troncos han de ser parejos y ha de seguirse siempre la misma técnica de encendido. Cranberg recomienda, si la madera está curada, encender el fuego con papel de periódico, y con ramas o arbustos, si la madera está todavía verde).

Se puede sustituir los leños de madera por troncos de papel prensado que se vende en el mercado. (Existen troncos similares de papel encerado que están ideados para quemarse por sí mismos.) ¿Podrá el lector conseguir un método de colocación de los troncos que supere la técnica de Cranberg? Mientras lo intenta también podría comprobar las propiedades de transmisión de calor que tienen las pantallas de cristal o metal que se colocan frente al fuego. La forma en que el calor se irradia no cambia demasiado por el hecho de poner la pantalla, aunque algo sí lo hace, pero lo que sí notará es que el agua de los frascos se calentará más lentamente.

En mi colaboración de febrero describí los cepillos de Haidinger (la figura en forma de reloj de arena que se puede ver al mirar hacia una luz linealmente polarizada), así como varios experimentos que se podían hacer con la figura y una lámina de un cuarto de onda fabricada en casa. Parte de la explicación de aquella serie de experimentos estaba basada en, o dependía de, la birrefringencia de la córnea, la cual atribuía a una preferencia en la orientación de las fibrillas de colágeno en dicha córnea. Frederick A. Bettelheim, de la Universidad de Adelphi, me ha corregido. De acuerdo con la investigación por él y sus colaboradores realizada, solamente el 25 por ciento de la birrefringencia de la córnea depende de una determinada orientación de las fibrillas, el otro 75 por ciento tiene su origen en el hecho de que estas fibrillas, largas y delgadas, no tienen el mismo índice de refracción que el material sobre el que se encuentran situadas. Las fibrillas de un mismo estrato son todas paralelas, pero su orientación varía de una forma casi aleatoria de un estrato a otro a lo largo de todo el espesor de la córnea. Como las fibrillas son birrefringentes contribuirían grandemente a la birrefringencia neta de la vista si estuvieran situadas paralelamente a lo largo del espesor de la córnea, pero el hecho de que estén situadas al azar hace que dicha contribución se vea muy disminuida.

Libros

La edificación entendida como un sistema global, la psicología skinneriana y los libros sobre herbarios

Rafael de Heredia, Adolfo Tobeña y Philip Morrison

ENERGIA, MEDIO AMBIENTE Y EDIFICACION, por Philip Steadman; H. Blume Ediciones; primera edición española 1978 de la edición americana 1975; 310 páginas. El contenido de esta obra es indudablemente de la máxima actualidad en todo el mundo y singularmente en aquellos países que no son autosuficientes en sus fuentes energéticas y, por consiguiente, han de importar gran parte de tales recursos. Para éstos, llegar a utilizar todas las formas de energía presentes en la naturaleza, y hacerlo de manera que se liberen de su dependencia de los recursos clásicos –petróleo y otros–, es de singular importancia. El uso de las energías solar y eólica, además de poder constituir fuentes importantes en el futuro, tienen particular interés al relacionarlo con otro aspecto que hoy preocupa seriamente a todo el planeta: la contaminación ambiental. Poder utilizar de manera normal, y ya fuera del plano experimental, fuentes energéticas limpias sería del máximo interés para la humanidad. Y ello en sus aspectos económico y social. Queda un largo camino por recorrer para hacer que estas energías lleguen a producir la cantidad precisa para todos los usos. Pero si nos centramos en la energía solar, sí se ha llegado ya a un estado que permite concebir muy fundadas esperanzas de que en un plazo muy breve el Sol sea la fuente energética que cubra una parte importante de nuestras necesidades con una considerable economía de otros recursos (petróleo, otros combustibles sólidos y los materiales radiactivos). En las aplicaciones energéticas más sencillas, tales como calefacción y calentamiento de agua, la utilización de la energía solar es ya un hecho en vías de desarrollo; no ocurre igual en la fase de producción de energía eléctrica en gran escala, en donde sólo se ha alcanzado un nivel experimental.

La aparición a escala "utilizable" de estos nuevos recursos energéticos constituye, o deberá constituir, una auténtica revolución en las técnicas de las instalaciones en edificios, y así deberían considerarse desde su concepción global. Si cada edificio, fuera el que fuese su destino, se concibiera dentro del concepto actual de "sistema", no cabe duda que las consideraciones que afectan a un componente tan esencial como es la energía deberían incidir en la concepción del "sistema edificio".

Este libro, aunque escrito con datos de 1973 y publicado en su edición original en el año 1975, tiene a mi juicio la importancia, realmente grande, de dar una exposición clara y ordenada del estado de la técnica en esa época; mas por tratarse de una tecnología en pleno y permanente desarrollo, puede que, en algunos casos, su contenido no sea el de la última frontera de la técnica. Pero esto pasa siempre en las tecnologías vivas y recientes. En lo referente al uso de la energía solar y la eólica y al modo de conservación de la energía, aunque no plantea problemas esencialmente nuevos, sí constituye novedad la preocupación por su utilización racional y eficaz, ya que es aquí en donde se está experimentando.

A mi juicio, algo realmente importante al proyectar una construcción es concebirla como un sistema completo que a su vez ha de insertarse en otro más amplio que es su entorno natural en el que debe considerarse, porque existen coacciones o limitaciones de toda índole, desde las climatológicas hasta las económico-sociales. Y cómo no, las culturales. Dentro de esta idea general es como enfoca Philip Steadman el complejo problema que resume en el título de su libro. Y a estos efectos tanto la "Introducción" como el primer capítulo que denomina "Nota sobre energía, medio ambiente y la arquitectura del movimiento moderno", me parecen de lo más interesante y significativo.

En ellas se ve cómo en una sociedad desarrollada tecnológicamente (los Estados Unidos de América), las instituciones puramente culturales (la Academia de Ciencias de Filadelfia), al encargar el proyecto de un nuevo museo [de Historia Natural] piensan, en el año 1973, y adelantándose a la preocupación energética mundial, que el nuevo edificio debe diseñarse "adoptando principios ecológicos, así como que debe conservar materiales y energía y, por medio de su arquitectura e ingeniería, causar la mínima perturbación posible en el paisaje e incluso, en alguna medida, restablecer y realizar su entorno natural y reducir a un mínimo su contribución a la contaminación de las aguas y de la atmósfera".

Este objetivo, realmente ejemplar en algo promovido por una institución pública, es buena muestra del porqué se llega a los adelantos tecnológicos: "que para llegar a ellos hay que aceptar los retos a los que nos enfrenta la sociedad y ser conscientes de ellos". Esta frase, entresacada de la Introducción, induce a continuar con la lectura del libro y lo sitúa en lo que, en mi opinión, ya expresada en líneas generales en los párrafos anteriores, debe constituir la esencia de un proyecto de construcción.

Señala Steadman otro punto importante y fundamental, a pesar de lo olvidado que se ve en la gran mayoría de las construcciones. Y es el hecho de que un aspecto de la actual arquitectura, que ha sido causa de un gran derroche de energía, es la creciente complejidad tecnológica del diseño arquitectónico y de ingeniería de los servicios mecánicos en los grandes edificios modernos. Y cómo en esta complejidad ha llegado la especialización y la división de responsabilidades entre los diferentes profesionales que intervienen en el proyecto de una construcción, de manera que en general el arquitecto no posee una visión y un control completo de todo el proceso, y precisa de consultores. Para seguir considerando la construcción como un sistema y no caer en el determinismo analítico, que lleva a que cada diseño sea bueno en sí pero sin acoplamiento con el conjunto, es preciso llegar a equipos pluridisciplinares conjuntados, en donde el director del equipo tenga en cuenta desde el primer momento todo lo que constituye el sistema y pueda, así, conseguir que todo el equipo sea consciente de los problemas energéticos y ambientales.

Tras la Introducción y el primer capítulo, conceptuales, pasa el autor a examinar en detalle las "medidas de conservación de la energía en la edificación", aportando una gran cantidad de datos y observaciones útiles y una lista de comprobación, clásica en los manuales americanos, y que consideramos de gran utilidad con el fin de hacer que el diseño se adapte mejor a la conservación energética.

El capítulo siguiente se dedica a la energía solar. Tras efectuar un estudio histórico de sus aplicaciones, examina a continuación los sistemas utilizados tanto para calentamiento de agua como para calefacción. Incluye este capítulo una gran profusión de esquemas de proyectos cons-

truidos, en los que tanto por la descripción como por la parte gráfica pueden verse en detalle los sistemas seguidos. Llegan estos proyectos hasta los realizados en 1974. Este capítulo constituye el núcleo de la obra. Siguen otros apartados sobre energía eólica e hidraúlica "a pequeña escala", de las que igualmente realiza un resumen histórico de su desarrollo y pasa revista a las aplicaciones actuales.

Continúa la obra con un capítulo dedicado a la "descomposición controlada, tratamiento de residuos y gas metano como combustible", que se inscribe mejor en los medios de protección del medio ambiente que en la energía. Igual que en los temas anteriormente tratados, hace historia de su desarrollo para entrar en las técnicas de transformación de las basuras en "compost" y, desde este punto, llegar a las tecnologías de aprovechamiento energético de los residuos orgánicos.

Termina la obra con unas notas sobre conservación y recogida local del agua con recomendaciones para su reutilización, y con otro capítulo en el que se exponen algunas realizaciones de edificación en las que se han tenido en cuenta los principios de utilización de las fuentes "ecológicas" energéticas, así como la manera de evitar la contaminación ambiental. Es de señalar que en un apéndice se dan datos correspondientes a España y que son aplicables al empleo de la energía solar.

Cada capítulo va acompañado de una extensa reseña bibliográfica sobre cada tema, así como de una indicación de las entidades, comerciales o no, que se dedican al mismo. La única salvedad que me parece oportuno realizar es que las referencias son del año de la publicación del original, elemento a tener en cuenta por el desarrollo habido desde esa fecha. En las referencias a entidades españolas, que se concretan a la energía solar, debe señalarse que son incompletas. La traducción al castellano de esta obra está verdaderamente cuidada. (R. H.)

PRINCIPIOS BASICOS DEL APRENDIZAJE, por R. M. Tarpy. Madrid; Debate, 1977. ("Basic principles of learning"; Scott, Foresman & Co., 1975). Ante la obra de R. M. Tarpy, "Principios básicos del aprendizaje" deben constatarse dos hechos. En primer lugar, celebrar la traducción de un texto, relativamente moderno, sobre un tema de investigación psicológica rico, cambiante, de importancia creciente; y por una intención introductoria claramente conseguida. En segundo lugar, lamentar que la traducción de esta obra venga sola: que no vaya acompañada de la traducción de otras obras sobre la misma materia, que han aparecido al mismo tiempo, y que suponen aportaciones más importantes que el libro de Tarpy. Por citar dos ejemplos, valgan la obra de N. J. Mackintosh (*The Psychology of animal learning*, 1974) y la obra de J. A. Gray (*Elements of two process theory of learning*, 1975).

La obra de Tarpy resume la situación, hasta 1972, de los diversos tópicos de la psicología experimental que se incluyen bajo la denominación de psicología del condicionamiento y aprendizaje. Al cabo de una docena de años, la aportación de Tarpy conecta directamente con la obra fundamental de Kimble (*Hilgard and Marquis' Conditioning and learning*, 1961), de la cual recibe una influencia muy directa. Sobre todo, para recoger los frutos de la inmensa tarea de recopilación y sistematización realizada por Hilgard, Marquis y Kimble, y poder trabarla adecuadamente con una revisión de material más reciente.

Pero al mismo tiempo Tarpy se distancia de Kimble al eludir las grandes teorías del aprendizaje, que como el mismo Tarpy se apresura a anunciar en el prólogo "han ido desapareciendo del campo del aprendizaje animal". Y centra su trabajo en una exposición de la investigación paramétrica sobre los diversos paradigmas y fenómenos del condicionamiento clásico y del condicionamiento instrumental; y en la exposición breve (a veces, incluso, demasiado sumaria) del trabajo y la discusión sobre las pequeñas teorías o las miniteorías (así se las ha llamado) que intentan sistematizar cada uno de los variados problemas que presenta un campo especialmente rico y productivo de la psicología experimental. De esta manera puede incorporar las significativas aportaciones, al cuerpo de conocimientos sobre el aprendizaje animal, de autores como Solomon, Rescorla, Herrnstein, Premack, Capaldi, Bolles, Seligman, Black, Kamin y muchos otros, junto con los respectivos grupos de trabajo donde están incorporados. Introduce además, someramente, diversos temas especialmente relevantes para las teorías del aprendizaje: las restricciones de las leyes del aprendizaje; la interacción experimental (transferencia de control) entre el condicionamiento clásico y el instrumental; la indefensión aprendida, en condicionamiento instrumental aversivo, etc. Y esboza nuevas aproximaciones teóricas, como la teoría correlacional del condicionamiento clásico (Rescorla); la hipótesis secuencial para el efecto del reforzamiento parcial (Capaldi); la aproximación neocognitiva al reforzamiento (Bolles); la teoría del reforzamiento en función de la prepotencia de las respuestas (Premack), etcétera. Todo ello en un ejemplo palpable de revisión dedicada a subrayar las aproximaciones y esfuerzos con viabilidad que se han dado, tanto a nivel experimental como a nivel teórico, en el campo del condicionamiento durante los años sesenta y a comienzos de los setenta.

La brevedad y concisión del libro determina alguna de sus virtudes. Se trata de un buen texto introductorio. Los aspectos definitorios están bien resueltos. Hay precisión, rigor y claridad expositiva, en un campo donde ello no acostumbra a ser la norma. Asimismo, hay acierto en la selección y en el énfasis con que se tratan los aspectos relevantes de cada tema. Por todo ello, nos encontramos ante una obra útil para los que se inician en la psicología experimental, y para todos aquellos científicos del comportamiento (psicofisiólogos, neurofisiólogos, psicofarmacólogos, bioquímicos, etcétera) que necesitan familiarizarse con los paradigmas y modelos del conocimiento y aprendizaje. Cabe subrayar además que se ha hecho una traducción correcta en un campo donde tampoco es la norma. Quizás el mejor elogio en este sentido sea que en la mayor parte del libro, salvo contados momentos, la traducción no se nota. E incluso se aprecia un esfuerzo en la adaptación terminológica, con resultados notables en algún caso y un poco sorprendentes en algún otro.

Pero la brevedad y concisión del libro determina también muchos de sus defectos. A pesar del manejo de nuevas aproximaciones a los problemas del condicionamiento, y a pesar de la introducción de perspectivas más complejas en el abordaje de estos temas de investigación, en pocas ocasiones consigue el autor expresar y comunicar la vivacidad y el importante ritmo de producción de ideas y de generación de nuevos problemas, que existe en las diferentes materias que trata. El autor actúa más como un fedatario esquematizador —¿un excesivo acento de revisión aséptica, quizá?—, que como un incitador de cuestiones. En demasiadas ocasiones el autor se limita a dejar constancia de las diferentes aproximaciones existentes sobre un problema, e inhibe toda elaboración personal con la consabida y excesivamente prudente posición de repartir razón a todo el mundo. A ello debe añadirse la falta de una delimitación previa y precisa del campo de trabajo, en relación con fenómenos como la habituación, la atención y la memoria, que aún dentro del marco de la misma psicología experimental, es hoy en día absolutamente necesaria. Por otra parte, las aplicaciones y derivaciones de los principios del aprendizaje son tratadas con tal parquedad, que en realidad quedan poco justificadas. Asimismo hay una dedicación ínfima a la necesidad de relacionar el condicionamiento y el aprendizaje con las aportaciones fisiológicas sobre la materia. Por último, hay una disparidad de calidad entre los diferentes temas abordados. Así, mientras algunos capítulos están bien tratados en conjunto, hay otros como el

dedicado a la extinción y el dedicado al castigo, por ejemplo, que resultan insuficientes y desiguales.

El libro de Tarpy, finalmente, viene a corroborar un hecho obvio: se puede hacer un libro en los años setenta sobre el condicionamiento y el aprendizaje, incorporando la aportación, ciertamente importante, de la escuela skinneriana (el análisis experimental del comportamiento), pero dejándola en sus restringidos límites. Tengo interés en remarcar este punto, por cuanto, en mi opinión, el mercado editorial en lengua castellana ha "sufrido" durante los últimos años una inflación relativa de obras de inspiración skinneriana. Parece como si todas las obras sobre condicionamiento debieran subsumirse y reconocerse en la posición teórica skinneriana. Se trata, evidentemente, de un proceso de inflación relativa, que surge únicamente al comparar con los libros de psicología del condicionamiento de orientación general traducidos últimamente. Y debe reconocerse que este tipo de inflaciones son con toda seguridad provechosas, o al menos muy poco perniciosas. (A. T.)

AN ILLUSTRATED HISTORY OF THE HERBALS, por Franck J. Anderson. Columbia University Press. Desde que la palabra escrita ofreció la oportunidad de codificar, ampliar y dar a conocer un saber tan preciado, los libros sobre la farmacia de la naturaleza constituyeron los instrumentos principales del curandero erudito. Incluso en los escritos más antiguos – jeroglíficos, escritura cuneiforme o ideogramas – son bien conocidos los trabajos de este tipo. Los primeros libros impresos de Europa incluían dichos manuales, ilustrados como ayudas visuales prácticas para recolectores profanos de plantas con propiedades poderosas, así como para médicos elegantes y sus ricos clientes. Estos volúmenes son los herbarios, tema de este modesto libro. Es una guía completa y bien ilustrada, no sobre las plantas, sino sobre los antiguos libros de plantas.

Se describen por orden cronológico más de 30 libros famosos. Sus contenidos, que vienen a reflejar más el mundo natural y menos el mundo azaroso de la tradición, están perfectamente caracterizados. Cien ilustraciones sirven de muestra de otras tantas plantas y animales, de sabios y médicos de valía en actitud conspicua de consulta, y páginas titulares alegóricas. El primer libro estudiado es, con razón, la *Materia medica* del médico griego Dioscórides, modelo clásico para la mayor parte del género, mediante multitud de manuscritos en media docena de idiomas. La ciencia de la botánica comenzó como tal, tan pronto como los estudiosos del Renacimiento se dieron cuenta que muchas plantas elogiadas en esa obra no siempre se encontraban en los campos franceses o flamencos, por larga y exhaustiva que fuese la búsqueda.

Uno de los últimos herbarios que se incluyen es el *Phytobasanos, sive plantarum aliquot Historia* de Fabio Collonna, quien, con Galileo, pertenecía a la academia de Lynxes. Su libro, impreso en 1592 con sus propios grabados en madera, daba gran énfasis a la información botánica, aunque también intentaba ofrecer una clave para las plantas medicinales clásicas. Fue uno de los primeros en darse cuenta, gracias a su ojo clínico, de que las partes y semillas de la flor revelan mejor las propiedades de la planta que la forma de la hoja, "especialmente si tienen el mismo sabor que las otras partes de la planta".

Los herbarios señalan el nacimiento de una botánica más profunda; además son exponentes del desarrollo de la imprenta, del texto e imagen, y de todo el entorno del libro de la civilización occidental. Anderson mismo es un experto bibliófilo de botánica y traductor, y ha añadido, a cada breve capítulo, una serie de notas bibliográficas que recogen la historia del libro impreso. La obra, enciclopédica y un tanto dispersa, *Buch der Natur* constituyó un auténtico "best-seller" del siglo XV, incluso como manuscrito. Los impresores de los Augsburgo sacaron seis ediciones antes de 1500, ilustradas por los mejores grabadores en madera. En él apareció por primera vez un grabado que mostraba las plantas en sí mismas, no ya como puro adorno o perdidas en paisajes, y también el primer grabado de animales.

Pero Conrad von Megenberg también cuenta sus propias experiencias, que son auténticas maravillas: un arco iris blanco, un meteoro y el amenazador uso de armas de fuego cerca de Ratisbona, hacia 1350. En 1530, año del gran herbario Brunfels, su magnífico ilustrador Han von Weiditz dibujaba las plantas tal y como las veía; algunas veces con dibujos pormenorizados, otras con un tallo roto o una hoja estropeada, según contemplara el ejemplar en ese momento. La mayoría de las figuras que aquí se muestran están a media escala. El lector afortunado que tenga acceso a una biblioteca de libros raros podrá buscar los herbarios en su tamaño natural. Se puede encontrar, por ejemplo, la primera representación del maíz en la gran *De historia Stirpium*, de Leonard Fuchs. Algunos especialistas prefieren las versiones en octavo de Fuchs, guías de bolsillo del siglo XVI, porque opinan que, a toda plana, la línea de los 500 grabados es demasiado débil y fina. Anderson traza un delicioso jardín en este compendio de erudición. Se echa de menos referencias bibliográficas a algunos buenos facsímiles modernos citados. Quizá siguen siendo el sueño del bibliófilo. (Ph. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA CENTRIFUGA DE GAS

THE TECHNICAL BASIS OF THE GAS CENTRIFUGE. Donald R. Olander en *Advances in Nuclear Science and Technology: vol. 6*, dirigido por Ernest J. Henley y Jeffery Lewins. Academic Press, Inc., 1972.

URANIUM ENRICHMENT BY GAS CENTRIFUGE. D. G. Avery y E. Davies. Mills & Boon Limited, Londres, 1973.

CENTRIFUGATION. Stelio Villani en *Isotope Separation*. American Nuclear Society, 1976.

VIENTOS ESTELARES

THE CIRCUMSTELLAR ENVELOPE OF ALPHA HERCULIS. Armin J. Deutsch en *The Astrophysical Journal*, vol. 123, nº 2, pág. 210; marzo, 1956.

THE SOLAR WIND. E. N. Parker en *Scientific American*, vol. 210, nº 4, págs. 66-76; abril, 1964.

THE FAR-ULTRAVIOLET SPECTRA OF SIX STARS IN ORION. Donald C. Morton en *The Astrophysicalk Journal*, vol. 147, nº 3, págs. 1017-1024; marzo 1967.

LOS HOMINIDOS DE TURKANA ORIENTAL

EARLIEST MAN AND ENVIRONMENTS IN THE LAKE RUDOLF BASIN: STRATIGRAPHY, PALEOECOLOGY AND EVOLUTION. Dirigido por Yves Coppens, F.C. Howard, Glynn Ll. Isaac y Richard E. F. Leakey. University of Chicago Press, 1976.

HUMAN ORIGINS: LOUIS LEAKEY AND THE EAST AFRICAN EVIDENCE. Dirigido por Glynn Ll. Isaac y Elizabeth R. McCown. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

KOOBI FORA RESEARCH PROJECT, vol. 1: THE FOSSIL HOMINIDS AND AN INTRODUCTION TO THEIR CONTEXT 1968-1974. Dirigido por Mary Leakey y Richard E. F. Leakey. Oxford University Press, 1978.

EL TOMATE

THE HISTORY OF THE USE OF THE TOMATO: AN ANNOTATED BIBLIOGRAPHY. G. A. McCue *Annals of the Missouri Botanical Garden*, vol. 39, págs. 289-348; 1952.

POTENCIAL GENETIC RESOURCES IN TOMATO SPECIES: CLUES FROM OBSERVATIONS IN NATIVE HABITATS. Charles M. Rick en *Genes, Enzymes, and Populations*, dirigido por Adrian M. Srb. Plenum Press, 1973.

VARIETAL INFLUENCE ON NUTRITIONAL VALUE. M.A. Stevens en *Nutritional Qualities of Fresh Fruits and Vegetables*, dirigido por Philip L. White. Futura Publishing Company, Inc., 1974.

THE TOMATO. Charles M. Rick en *Handbook of Genetics:* vol. 2, dirigido por Robert C. King. Plenum Press, 1975.

COLISIONES DE HADRONES A MUY ALTA ENERGIA

REGGEON FIELD THEORY: FORMULATION AND USE. H.D.I. Abarbanel, J.B. Bronzan, R.L. Sugar y A.R. White en *Physics Reports*, vol. 21, pág. 119, 1975.

REGGE THEORY AND HIGH ENERGY PHYSICS. P.D.B. Collins, Cambridge University Press, 1977

RECENT DEVELOPMENTS IN REGGEON FIELD THEORY. M. Moshe en *Physics Reports*, vol. 37, pág. 225, 1978.

EL TERMOSTATO DE LOS VERTEBRADOS

PROBING THE ROSTRAL BRAINSTEM OF ANESTHETIZED, UNANESTHETIZED, AND EXERCISING DOGS, AND OF HIBERNATING AND EUTHERMIC GROUND SQUIRRELS. Harold T. Hammel, H. Craig Heller y F. R. Sharp en *Federation Proceedings*, vol. 32, págs. 1588-1596; 1973.

THERMOREGULATION DURING SLEEP AND HIBERNATION. H. Craig Heller y S.F. Glozbach en *International Review of Physiology*, vol. 15, págs. 147-187; 1977.

SLEEP AND HIBERNATION: ELECTROPHYSICAL AND THERMOREGULATORY HOMOLOGIES. H. Craig Heller, J. M. Walker, G.L. Florant, S.F. Glotzbach y R. J. Berger en *Strategies in Cold: Natural Torpidity and Thermogenesis*, dirigido por Lawrence Wang and Jack W. Hudson. Academic Press, Inc., 1978.

EL PROBLEMA DE LAS TECTITAS

ON THE LUNAR ORIGIN OF TEKTITES. Dean R. Chapman y Howard K. Larson en *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, n.º 14, pags. 4305-4358; 15 de julio de 1963.

THE CHEMISTRY, ORIGIN AND PETROGENETIC IMPLICATIONS OF LUNAR GRANITE AND MONOZONITE. M. J. Rutherford, P. C. Hess, F. J. Ryerson, H.W. Campbell y P. A. Dick en *Proceedings of the Lunar Science Conference, Seventh, 1976*. Pergamon Press, 1976.

TEKTITES AND THEIR ORIGIN. John A. O'Keefe. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

ORGANISMOS QUE CAPTAN CORRIENTES

WIND-INDUCED VENTILATION OF THE BURROW OF THE PRAIRE DOG, *CYNOMYS LUDOVICIANUS*. Steven Vogel, Charles P. Ellington y Delbert L. Kilgore, Jr., en *Journal of Comparative Physiology*, vol. 85, n.º 1, págs. 1-14; 1973.

CURRENT-INDUCED FLOW THROUGH LIVING SPONGES IN NATURE. Steven Vogel en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 74, n.º 5, págs. 2069-2071; mayo 1977.

BRACHIOPOD ORIENTATION TO WATER MOVEMENT. 1: THEORY LABORATORY BEHAVIOR AND FIELD ORIENTATIONS. Michael C. LaBarbera en *Paleobiology*, vol. 3, n.º 3, págs. 270-287; verano, 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

SOME NOVEL MÖBIUS STRIPS. Charles Joseph Matthews en *Mathematics Teacher*, vol. 65, n.º 2, págs. 123-126; febrero, 1972.

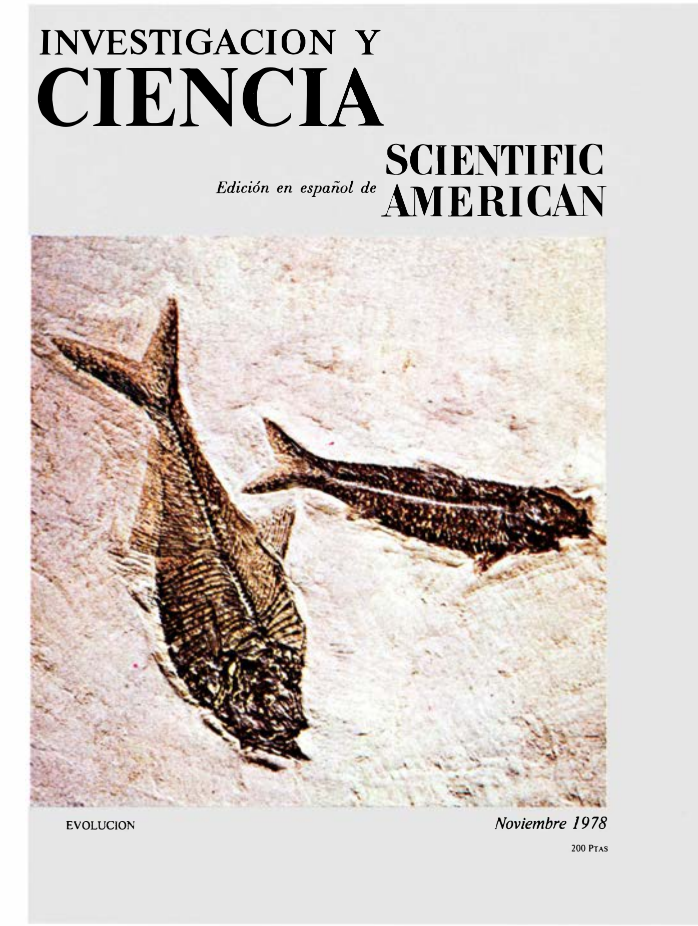
THE THEORY OF BRAIDS AND THE ANALYSIS OF IMPOSSIBLE FIGURES. Thaddeus M. Cowan en *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 11, n.º 3, págs. 190-212; agosto, 1974.

ORGANIZING THE PROPERTIES OF IMPOSSIBLE FIGURES. Taddeus M. Cowan en *Perception*, vol. 6, n.º 1, págs. 41-56; 1977.

TALLER Y LABORATORIO

BASIC MECHANISM IN FREE ABRASIVE GRINDING. Edward J. Saccocio en *Applies Optics*, vol. 14, n.º 11, págs. A224-A227; noviembre, 1975.

EL PROXIMO NUMERO, EXTRAORDINARIO Y MONOGRAFICO, ESTARA DEDICADO A LA EVOLUCION.



LA EVOLUCION ES LA TEORIA GENERAL DE LA VIDA. MOTIVO ANTAÑO DE AGRIAS DISPUTAS CIENTIFICAS, SE HA CONVERTIDO HOY EN EL TEMA CLAVE QUE DA UNIDAD A LOS AVANCES EN FISICA, QUIMICA, GEOLOGIA Y BIOLOGIA

Propuesta en 1853 por Charles Darwin y Alfred Wallace para explicar la maravillosa diversidad de los seres, la evolución desentraña hoy las páginas oscuras de la historia del universo, la historia de la tierra, la historia de la vida y la historia del hombre. ¿Hasta qué punto puede éste cambiarla? ¿Cómo se manifiesta hoy? ¿Hacia dónde se dirige?

LA EVOLUCION, por Ernst Mayr
Marco general de las líneas dominantes en la interpretación del fenómeno evolutivo.

LOS MECANISMOS DE LA EVOLUCION, por Francisco J. Ayala
La genética molecular, al explicar la naturaleza y las causas de las mutaciones, da cuenta de la variación intraespecífica.

EVOLUCION QUIMICA Y ORIGEN DE LA VIDA, por Richard E. Dickerson
Los pasos que marcan la historia de la vida desde las primeras moléculas orgánicas.

EVOLUCION DE LAS PRIMERAS CELULAS, por J. William Schopf
Durante tres mil millones de años, los únicos seres vivientes fueron microorganismos primitivos.

ADAPTACION, por Richard C. Lewontin
El ajuste exacto entre el organismo y su ambiente constituye una clave de interés para resolver muchos problemas evolutivos.

EVOLUCION DE LAS PLANTAS Y LOS ANIMALES, por James W. Valentine
La aparición de estos organismos es muy reciente en la escala geológica. Sus antepasados se encuentran en seres unicelulares.

EVOLUCION DE LOS SISTEMAS ECOLOGICOS, por Robert M. May
La coevolución de las especies dentro de un ecosistema origina interesantes modelos ecológicos.

LA EVOLUCION DEL COMPORTAMIENTO, por John Maynard Smith
¿Cómo es que la selección natural puede favorecer pautas de comportamiento que van contra la supervivencia del individuo?

LA EVOLUCION DEL HOMBRE, por Sherwood L. Washburn
La abrumadora cantidad de testimonios fósiles apoyan la existencia de criaturas humanas hace ya cuatro millones de años.

EVOLUCION Y POLIMORFISMO CROMOSOMICO, por Antonio Prevosti
El intercambio de información entre las dotaciones genéticas de los individuos de la misma especie posibilita la existencia de nuevas especies.

INVESTIGACION Y
CIENCIA